

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

IMPACT DES FACTEURS ABIOTIQUES, DES MATÉRIAUX DE
CONSTRUCTION ET DE LA TAILLE DU PIÈGE PYRAMIDAL SUR LES
CAPTURES DE MÂLES ET FEMELLES DU CHARANÇON DE LA PRUNE,
CONOTRACHELUS NENUPHAR (HERBST)

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN BIOLOGIE

PAR
STEVE LAMOTHE

Octobre 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

Le chapitre I, intitulé "Abiotic factors and trap design modulate the performance of traps used to monitor the plum curculio, *Conotrachelus nemuphar* (Herbst)", a été accepté en janvier 2007 au Journal of Economic Entomology. Les lignes directrices de l'expérimentation ont été déterminées par les auteurs de l'article et la rédaction est principalement mon œuvre, avec un commun accord des autres auteurs concernant le contenu. Les auteurs dans l'ordre sont Steve Lamothe, Gérald Chouinard et Charles Vincent.

Le chapitre II, intitulé "Effets de la taille du piège pyramidal en bois sur la capture du charançon de la prune, *Conotrachelus nemuphar* (Herbst), en vergers de pommiers" est une partie d'une expérimentation qui deviendra un second article. Les lignes directrices de cette partie d'expérimentation ont été établies par l'ensemble des auteurs et la rédaction est principalement mon œuvre, avec un commun accord des autres auteurs concernant le contenu. Les auteurs dans l'ordre sont Steve Lamothe, Gérald Chouinard, Daniel Cormier, Franz Vanoosthuyse et Charles Vincent.

REMERCIEMENTS

Le présent mémoire est l'accomplissement d'un projet de maîtrise qui s'est étalé sur plus de deux ans pendant lesquelles de nombreuses personnes ont contribué, de près ou de loin, aux diverses étapes. Je tiens donc à les remercier, car sans eux je ne serais pas rendu où j'en suis.

Tout d'abord, je veux remercier le Dr Gérald Chouinard de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) et le Dr Charles Vincent du Centre de Recherche et de Développement en Horticulture (CRDH) d'Agriculture et agroalimentaire Canada (AAC), qui sont respectivement mon directeur et mon co-directeur de recherche. Ils m'ont donné la chance d'entreprendre des études de deuxième cycle, d'apprendre beaucoup sur un insecte que je ne connaissais pas et ils ont su faire progresser mon projet par leurs commentaires constructifs.

Je tiens également à remercier tout spécialement Pierre Lemoyne (AAC-CRDH) qui a su répondre à mes nombreuses questions techniques tout au long de ce projet, questions qui n'ont pas toujours été évidentes à résoudre et à me fournir un coup de pouce lorsque j'en avais besoin.

Je remercie aussi le Dr Tracy Leskey (ARS-USDA, Kerneyville, WA) qui a commenté le chapitre I.

Ce projet n'aurait pu être réalisé sans le financement du Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT) (No de projet: 2004-EN-102690).

Mes sincères remerciements aux membres de l'IRDA et du AAC-CRDH qui m'ont aidé lors de la construction de mes pièges et de mes cages, par le prêt de matériel nécessaire à l'expérimentation, en fournissant de l'information technique ou par leurs encouragements: Sylvie Bellerose, Guy Boulet, Daniel Cormier, Bernard Goyette, Guy Lahaie, Geneviève Larouche, Gaétan Racette, Benoit Rancourt et Franz Vanoosthuyse.

Je tiens à souligner ma reconnaissance au Dr Éric Lucas et aux membres de son laboratoire de lutte biologique à l'UQÀM pour les nombreux échanges scientifiques.

Je remercie Michèle Bernier-Cardou (Service canadien des forêts), Michèle Grenier (IRDA) ainsi que Bertrand Fournier de l'UQÀM pour l'aide apportée au développement de mes analyses statistiques.

Je me dois également de remercier les personnes qui m'ont permis de me rendre où je suis, c'est-à-dire ma famille, mon père Jean-Yves, ma mère Lucie et ma petite sœur Kathleen avec qui j'ai de très forts atomes crochus. Ils m'ont toujours supporté et encouragé dans les meilleurs moments comme dans les moins bons. À cette liste s'ajoute Cynthia, la personne avec qui je partage ma vie et par le fait même toutes mes nouvelles informations sur le charançon de la prune. En fait, je pense qu'elle en connaît presque autant que moi sur le sujet! Un gros merci à tous!

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS	ii
LISTE DES FIGURES	viii
LISTE DES TABLEAUX	xi
RÉSUMÉ	xii
INTRODUCTION	1
GÉNÉRALITÉS SUR LE CHARANÇON DE LA PRUNE	1
Caractéristiques	1
Aire de répartition	1
Cultures fruitières affectées	3
Migration saisonnière	6
RÉPRESSION	7
DÉPISTAGE	8
Battage	8
Détection visuelle des dommages de ponte	8
Pièges	9
Efficacité de captures des pièges	12
Taille des pièges	13
Positionnement du piège pyramidal en vergers	13
Appâts olfactifs	14
EFFETS DE CERTAINS FACTEURS ABIOTIQUES SUR L'ACTIVITÉ ET LE COMPORTEMENT DU CHARANÇON DE LA PRUNE	15
Scotophase et photophase	15
Température	16

Vent -----	17
Pluie -----	18
Humidité relative -----	18
Interactions entre les facteurs abiotiques -----	19
OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES -----	19
Chapitre I -----	20
Chapitre II -----	22
CHAPITRE I	
ABIOTIC FACTORS AND TRAP DESIGN MODULATE THE PERFORMANCE	
OF TRAPS USED TO MONITOR THE PLUM CURCULIO, <i>CONOTRACHELUS</i>	
<i>NENUPHAR</i> (HERBST) -----	
ABSTRACT -----	24
RÉSUMÉ -----	25
1.1. INTRODUCTION -----	26
1.2. MATERIALS AND METHODS -----	28
1.2.1. Experiment 1- overwintered adults -----	28
1.2.2. Experiment 2- summer adults -----	34
1.2.3. Experiment 3- overwintered adults, low temperatures -----	34
1.3. RESULTS -----	35
1.3.1. Experiment 1 and 2- overwintered and summer adults -----	35
1.3.2. Experiment 3- overwintered adults, low temperatures -----	42
1.4. DISCUSSION AND CONCLUSION -----	44
CHAPITRE II	
EFFETS DE LA TAILLE DU PIÈGE PYRAMIDAL SUR LES CAPTURES DU	
CHARANÇON DE LA PRUNE, <i>CONOTRACHELUS NENUPHAR</i> (HERBST), EN	
VERGERS DE POMMIERS -----	
RÉSUMÉ -----	48
2.1. INTRODUCTION -----	49
2.2. MÉTHODOLOGIE -----	50
2.2.1. Caractéristiques générales des vergers expérimentaux -----	50
2.2.2. Protocole expérimental -----	51

2.2.3.Traitement des données -----	53
2.3.RÉSULTATS -----	54
2.4.DISCUSSION-----	60
CONCLUSION -----	63
BIBLIOGRAPHIE-----	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Principales caractéristiques et différenciation sexuelle du charançon de la prune, *Conotrachelus nemuphar* (Hersbt) (Coleoptera : Curculionidae). A) Charançon adulte, B) sternites métathoraciques concaves des mâles et C) convexes des femelles.

----- 2

Figure 2. Aire de répartition nord-américaine du charançon de la prune, souche univoltine (zone grise) et multivoltine (zone hachurée) (Vincent *et al.*, 2004).

----- 4

Figure 3. Principaux pièges développés pour le dépistage du charançon de la prune. A) Piège pyramidal de Tedders et Wood, B) piège cylindrique de Leskey et Prokopy et C) piège en moustiquaire. Les trois pièges sont surmontés d'une pièce collectrice développée *a priori* pour le charançon du coton.

----- 10

Figure 4. A) Experimental set up in a controlled chamber and B) detail of dual fan system. IF = Industrial Fan and FSH = Fan with swivel head.

----- 29

Figure 5. Top view of area where groups of plum curculios were released (grey circles) at the base of pyramidal traps (black) in each cage.

----- 32

Figure 6. A) Mean proportion (\pm SE) of plum curculios caught by pyramidal traps during scotophase and photophase conditions, B) at 15, 20 and 25 °C, C) under wind and D) under rain conditions in relation to plum curculio physiological state. Within a physiological state, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).

----- 36

Figure 7. Mean proportion (\pm SE) of plum curculios caught by pyramidal traps at 15, 20 and 25 °C in relation to their physiological state and photoperiod. In a given physiological state and photoperiod, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$). ----- 37

Figure 8. A) Mean proportion (\pm SE) of males and female plum curculios caught by pyramidal traps in relation to their physiological state. B) Mean proportion (\pm SE) of male and female overwintered insects in relation to photoperiod. In a given physiological state or photoperiod, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$). ----- 39

Figure 9. Mean proportion (\pm SE) of plum curculios caught by pyramidal trap materials (wood, geotextile, screen and plastic) A) in relation to their physiological state and photoperiod, and B) their physiological state and rain conditions. In a given section, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).----- 41

Figure 10. Mean proportion (\pm SE) of overwintered plum curculios caught by pyramidal traps at 5, 10 and 15 °C in relation to the period of the day. Within a period of day, bars superscribed with different letters are significantly different (Poisson regression, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$). ----- 43

Figure 11. Dispositif pairé utilisé en vergers comprenant un piège pyramidal en bois de taille standard (hauteur : 122 cm) et un de taille miniature (hauteur : 45 cm). ----- 52

Figure 12. Captures bi-hebdomadaires du charançon de la prune (nombre d'individus) pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature du 10 mai au 5 juillet 2005. ----- 55

Figure 13. Différence entre les captures totales obtenues en 2005 avant (du 10 au 20 mai 20), pendant (du 21 mai au 2 juin) et après (du 3 juin au 5 juillet) la floraison pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature. Les étoiles indiquent des différences significatives entre les pièges (test de Wilcoxon apparié, $\alpha = 0,05$).----- 56

Figure 14. Captures bi-hebdomadaires du charançon de la prune (nombre d'individus) pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature du 2 mai au 10 juillet 2006. ----- 58

Figure 15. Différence entre les captures totales obtenues en 2006 avant (du 2 au 8 mai), pendant (du 11 au 15 mai) et après (du 18 mai au 10 juillet) la floraison pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature. Les étoiles indiquent des différences significatives entre les pièges (test de Wilcoxon apparié, $\alpha = 0,05$). ----- 59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Cultures fruitières pouvant servir de plante hôte au charançon de la prune (Hallman et Gould, 2004). -----	5
--	---

RÉSUMÉ

Le charançon de la prune, *Conotrachelus nemuphar*, est un des plus importants insectes ravageurs des cultures fruitières à noyaux et à pépins du nord-est de l'Amérique du Nord. Dans les vergers de pommiers québécois non traités, il peut engendrer des dommages à plus de 85 % des fruits à la récolte. De nombreux pièges ont été développés en vue de dépister le charançon de la prune et de réduire le nombre d'épandages préventifs de pesticides actuellement utilisés pour sa répression. Parmi les pièges actuellement en développement, le piège pyramidal en bois performe généralement mieux que les autres pièges, mais, il ne s'est pas encore révélé suffisamment efficace et fiable en vergers de pommiers pour que son utilisation soit recommandée à l'échelle commerciale.

La première partie de cette étude (2004-2005) consistait à déterminer si certains matériaux constituant le piège pyramidal pourraient influencer l'efficacité de capture du piège. Des modèles réduits de ce piège ont été construits en bois (standard), en géotextile, en moustiquaire et en plastique et ont ensuite été testés en conditions contrôlées, dans le but de déterminer l'impact des facteurs abiotiques (période de la journée, température, ventilation et précipitations) sur les captures.

Le piège pyramidal en géotextile a capturé plus d'individus (46 % des 1680 charançons) que les autres matériaux (bois: 36 %, moustiquaire: 37 %, plastique: 37 %) en conditions nocturnes. On a également observé une augmentation significative des captures de charançons lorsque la température augmentait (15, 20 et 25 °C). Ces résultats suggèrent que le géotextile peut être une alternative au bois pour l'amélioration des performances du piège.

La seconde partie de cette étude (2005-2006) avait pour objectifs de comparer les captures, obtenues en vergers, du piège pyramidal miniature avec celles du piège de taille standard ainsi que d'établir une relation mathématique entre le nombre de captures et le nombre de dégâts obtenus en vergers. Un dispositif pairé (un piège standard et un piège miniature) a été utilisé autour de 15 pommiers durant 8 semaines en 2005 et 10 semaines en 2006, et les captures relevés deux fois par semaine.

En 2005, le piège miniature a connu deux pics de captures (1^{er} pic les 27 et 30 mai : 108 captures, 2^e pic les 7 et 10 juin : 51 captures). Concernant l'effet de la taille des pièges, le piège de taille standard a capturé significativement plus d'individus pendant la floraison, mais le piège miniature a significativement mieux performé après la floraison. Une relation positive entre le nombre de captures (obtenues durant et après la floraison) et le nombre de dégâts observés (5 juillet) a également été établie pour le piège de taille standard et la version miniature. En 2006, le piège miniature a connu un seul pic important (les 5 et 8 mai : 33 captures). Le piège de taille standard a capturé significativement plus d'adultes que la version miniature durant la période précédant la floraison. Aucune corrélation n'a pu être établie entre les captures et les dégâts pour cette période. Les analyses de régression démontrent que pour des relations captures-dégâts en vergers, le piège de grande taille et le piège de petite taille ont des performances similaires. Toutefois, le piège de petite taille pourrait être plus avantageux car il est plus léger, plus facile à manipuler et moins coûteux à produire. Il semble possible d'établir une relation captures-dégâts lorsque les populations de charançons sont très importantes et qu'aucun ou peu de traitements visant ce ravageur aient été effectués.

Mots clés : Charançon de la prune, dépistage, pièges pyramidaux, matériaux, facteurs abiotiques.

INTRODUCTION

GÉNÉRALITÉS SUR LE CHARANÇON DE LA PRUNE

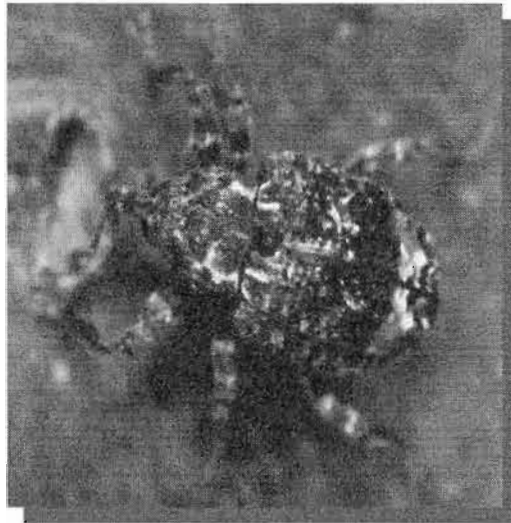
Caractéristiques

Le charançon de la prune (Fig. 1A), *Conotrachelus nemuphar* Herbst (Coleoptera : Curculionidae), est un insecte dont la taille adulte est de 4-6 mm de long (Chapman, 1938; Racette, 1988). Il se caractérise par une couleur cryptique qui varie de gris foncé à brun et par un arrangement de bandes et de plaques bigarrées faites de petits poils noirs et oranges. Le rostre de ce charançon est allongé. On retrouve quatre paires de protubérances sur les élytres (Chapman, 1938; Racette, 1988). Les deux paires les plus distantes sont basses et plus ou moins continues alors que les deux autres paires, plus rapprochées, sont divisées en trois bosses, dont celles du milieu sont deux fois plus hautes que les autres. Il est possible de distinguer les adultes mâles des femelles en observant les sternites métathoraciques (Thompson, 1932). On distingue sur les sternites des mâles deux structures concaves (Fig. 1B). Ces structures sont plutôt convexes chez les femelles (Fig. 1C).

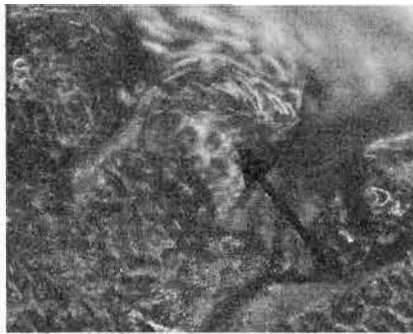
Aire de répartition

Le charançon de la prune est indigène à l'est de l'Amérique du Nord (Chapman, 1938; Paradis, 1956; Quaintance et Jenne, 1912). Deux souches de charançons de la

A)



B)



C)

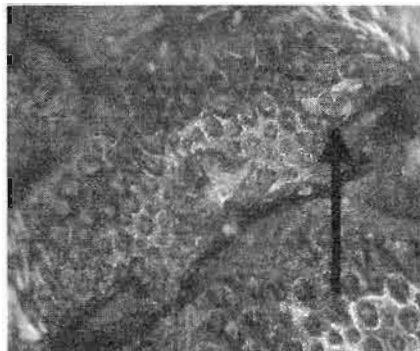


Figure 1. Principales caractéristiques et différenciation sexuelle du charançon de la prune, *Conotrachelus nemophar* (Herbst)(Coleoptera : Curculionidae). A) Charançon adulte, B) sternites métathoraciques concaves des mâles (Steve Lamothe) et C) convexes des femelles (Steve Lamothe).

prune se distinguent géographiquement et physiologiquement (Schoene, 1936; Racette *et al.*, 1992; Hallman et Gould, 2004). La souche du nord est univoltine, c'est-à-dire qu'elle produit une seule génération par année. L'aire de répartition de cette souche englobe le sud des provinces de Québec, de l'Ontario, de la Nouvelle-Écosse et les États américains au nord de la Virginie (Fig. 2). La souche du sud est multivoltine et peut produire de deux à trois nouvelles générations par année. L'aire de répartition de cette souche s'étend de la Virginie jusqu'au milieu de la Floride (Fig. 2). Ces deux souches de charançon de la prune sont incompatibles reproductivement (Padula et Smith, 1971).

Cultures fruitières affectées

Le charançon de la prune est considéré comme l'un des plus importants insectes ravageurs des cultures fruitières, indigènes ou introduites, à noyaux (pêche et prune) et à pépins (pomme et poire), qui font surtout partie de la famille des Rosaceae (Chapman, 1938; Armstrong, 1958; Racette *et al.*, 1992) (Tableau 1). Il est également un important ravageur du bleuet cultivé (Ericaceae) (Chapman, 1938; Hallman et Gould, 2004). Une étude (Hallman et Gould, 2004) portant sur les fruits subtropicaux et tropicaux pouvant servir de plante hôte à ce charançon a démontré qu'il pouvait s'alimenter également sur le loquat (Rosaceae) ainsi que sur le fruit de la passion (Passifloraceae). L'oviposition des femelles et le développement complet des individus de la nouvelle génération n'ont été observés que sur le loquat.

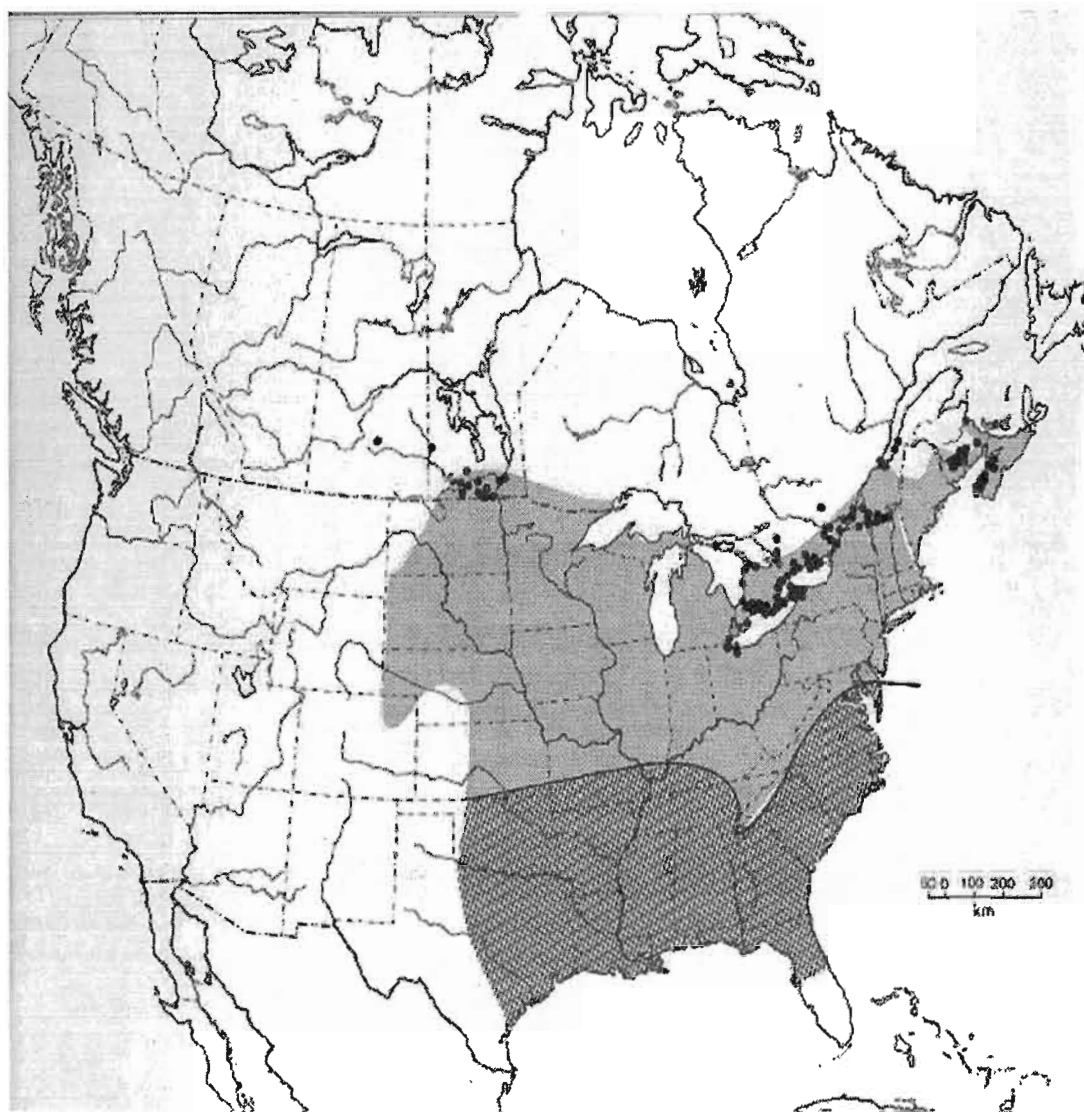


Figure 2. Aire de répartition nord-américaine du charançon de la prune, souche univoltine (zone grise) et multivoltine (zone hachurée) (Vincent *et al.*, 2004).

Tableau 1. Cultures fruitières pouvant servir de plante hôte au charançon de la prune. (Hallman et Gould, 2004).

Famille	Nom latin	Nom commun	Relation[*]
Crossulariaceae	<i>Ribes</i> spp.	Groseille	Oviposition
Ericaceae	<i>Vaccinium</i> spp.	Airelle et Bleuet	Hôte
Rosaceae	<i>Crataegus</i> spp.	Aubépine	Hôte
Rosaceae	<i>Cydonia</i> spp.	Coing	Hôte
Rosaceae	<i>Fragaria</i> spp.	Fraise	Oviposition
Rosaceae	<i>Malus</i> spp.	Pomme	Hôte
Rosaceae	<i>Prunus armeniaca</i> L.	Abricot	Hôte
Rosaceae	<i>Prunus domestica</i> L.	Prune	Hôte
Rosaceae	<i>Prunus pensilvanica</i>	Cerise de Pennsylvanie	Hôte
Rosaceae	<i>Prunus persica</i> L.	Pêche	Hôte
Rosaceae	<i>Prunus persica</i> variété <i>nectarina</i> L.	nectarine	Hôte
Rosaceae	<i>Prunus virginiana</i>	Cerise de Virginie	Hôte
Rosaceae	<i>Pyrus</i> spp.	Poire	Hôte
Vitaceae	<i>Vitis</i> spp.	Raisin	Oviposition

^{*}Le terme « hôte » signifie que le charançon de la prune peut s'alimenter, que les femelles peuvent pondre leurs œufs dans ces fruits et que le développement des nouveaux individus dans les fruits est possible. Le terme « Oviposition » signifie que les individus peuvent s'alimenter sur ces fruits, que les femelles pondent leurs œufs sur ces fruits et que le développement des nouveaux individus dans les fruits est incertain.

Au Québec, la principale production fruitière touchée par cet insecte est la pomme (Chouinard *et al.*, 2001). Les blessures causées aux fruits par cet insecte sont, par ordre d'importance : l'oviposition des femelles sur les pommettes, l'alimentation des adultes et l'alimentation des larves (Lafleur et Hill, 1987; Vincent *et al.*, 1999). Lorsque les larves présentes dans les pommettes s'alimentent, elles libèrent des enzymes (pectinase et cellulase) qui dégradent les fruits et causent leur chute prématurée (Levine et Hall, 1978).

Migration saisonnière

La souche univoltine du charançon de la prune hiberne tout l'hiver dans la litière des boisés localisés en périphérie des vergers (Bobb, 1949; Chapman, 1938; Quaintance et Jenne, 1912; Whitcomb, 1929). Cette litière est composée de feuilles d'érable, *Acer saccharum* (Marsh), et de feuilles d'autres espèces d'arbres caduques. Elle est caractérisée par un taux d'humidité élevé et de faibles mouvements d'air à travers les feuilles. Pendant l'hibernation se déroule la diapause qui est nécessaire à la maturation des organes reproducteurs des individus de la souche univoltine. Au printemps, dans les vergers du sud-ouest du Québec, les charançons émergent du sol des boisés périphériques vers la fin d'avril, mais ils restent peu actifs et ne migrent pas vers les vergers avant la mi-mai (Lafleur et Hill, 1987). À partir de la mi-mai (stade pré-bouton rose) et jusqu'au début juin (stade chute des pétales), le nombre d'individus dans les pommiers augmente rapidement (Chouinard *et al.*, 1994). Les plus fortes densités d'insectes sont habituellement observées un à deux jours après la chute des pétales (Chapman, 1938; Cox, 1951; Garman et Zappe, 1929; Quaintance et Jenne, 1912; Smith et Flessel, 1968; Snapp, 1930; Whitcomb, 1929). C'est également entre la mi-mai et le début juin que ces insectes couvrent les plus grandes distances lors de leurs déplacements (Lafleur et Hill, 1987). À partir du début juin, les

populations présentes dans les vergers déclinent (Armstrong, 1958; Lafleur *et al.*, 1985) car les adultes entreprennent leurs déplacements vers les sites d'hibernation.

RÉPRESSION

En vergers non traités avec des insecticides, les dommages engendrés par cet insecte peuvent atteindre plus de 85 % des pommes à la récolte (Vincent et Bostanian, 1988; Vincent et Roy, 1992). Afin de lutter contre ce ravageur, une pulvérisation préventive d'insecticides organophosphorés est habituellement effectuée sur l'ensemble du verger dans les jours suivants la fin de la chute des pétales (Chouinard *et al.*, 1992a). Une seconde pulvérisation, en périphérie du verger, est parfois effectuée 8 à 10 jours plus tard et, si cela est nécessaire, une troisième pulvérisation, identique à la seconde, est quelquefois nécessaire 8 à 10 jours plus tard (Chouinard *et al.*, 1992a; 1998; Vincent *et al.*, 1997). Un traitement est effectué chaque année dans les vergers commerciaux, car une période sans traitement variant entre un et trois ans est suffisante à l'insecte pour causer des dommages économiques à la récolte (Glass et Lienk, 1971; Hall, 1974; Hagley *et al.*, 1977). En dépit de toutes ces pulvérisations, aucune résistance aux insecticides n'a encore été rapportée chez ce ravageur (Vincent *et al.*, 1999). Les traitements d'insecticides préventifs utilisés contre le charançon de la prune représentent une bonne part de la charge environnementale des insecticides utilisés contre les divers insectes ravageurs agricoles au Québec, soit en moyenne 8 % des insecticides totaux utilisés dans les vergers québécois (Chagnon et Payette, 1990). Ces épandages préventifs peuvent avoir de nombreux effets adverses tels que des effets toxiques sur les insectes pollinisateurs, prédateurs et parasitoïdes présents dans les vergers, sur l'environnement et sur la santé humaine.

DÉPISTAGE

Les méthodes de dépistage en cours de développement visent à permettre la détection du charançon dans les vergers et l'évaluation de son abondance de façon efficace, et ce, afin de réduire ou de mieux cibler les épandages d'insecticides effectués contre cet insecte. Toutes les techniques actuelles comportent cependant d'importantes lacunes.

Battage

Le battage consiste à étendre une toile blanche sous un arbre et à frapper les grosses branches à quelques reprises avec un bâton afin de faire tomber les adultes sur la toile (Scott et Quaintance, 1911; Wylie, 1951). Cette technique a une efficacité très variable car elle est fonction entre autres du cultivar, de la forme des pommiers, de l'expérience du dépisteuse et de la période de la journée (Wylie, 1951; Le Blanc *et al.*, 1984; Racette *et al.*, 1990). Le battage peut également endommager les arbres et favoriser la chute prématurée des fruits (Racette *et al.*, 1990), ce qui n'est guère apprécié des producteurs.

Détection visuelle des dommages de ponte

Une seconde méthode consiste à détecter les dommages de ponte, en forme de croissant, qui sont visibles sur les pommettes durant les mois de mai et de juin (Hoyt *et al.*, 1983; LeBlanc *et al.*, 1984). Cette méthode peut être très efficace (seuil de dommage = 1 % des fruits observés) à condition de faire le suivi d'un grand nombre

de fruits trois fois par semaine car des dommages importants peuvent apparaître en une seule journée (Vincent *et al.*, 1997).

Pièges

Depuis plusieurs années, différents modèles de pièges servant à capturer d'autres ravageurs ont été modifiés ou de nouveaux ont été conçus afin de capturer le charançon de la prune en vergers de pommiers et de pêchers avant qu'il n'atteigne les pommiers ou du moins avant que les femelles pondent leurs œufs. Ces pièges se différencient autant par leur forme, leurs matériaux de construction que par leur positionnement dans les vergers.

Le piège pyramidal en bois (Fig. 3A), qui porte aussi le nom de « piège Tedders » en l'honneur du chercheur qui l'a conçu (Tedders et Wood, 1994), avait pour fonction initiale de capturer le charançon de la pacane, *Curculio caryae* (Horn) (Coleoptera : Curculionidae), un important ravageur de cette culture aux États-Unis. Il a été adapté pour capturer le charançon de la prune (Tedders et Wood, 1994). Ce piège est constitué de panneaux triangulaires en bois (122 X 55 cm), peints de couleur gris foncé ou noir, qui s'emboîtent l'un dans l'autre pour former une pyramide. Au sommet de cette pyramide, on retrouve une pièce collectrice identique à celle utilisée pour le piégeage du charançon du coton, *Anthonomus grandis* Boheman (Coleoptera : Curculionidae). Cette pièce collectrice est basée sur le principe du goulot de bouteille inversée qui favorise l'entrée des insectes mais rend leur évaison difficile. L'effet attractif du piège pyramidal résiderait dans le fait qu'il imite la silhouette d'un tronc (Tedders et Wood, 1994; Tedders *et al.*, 1996; Piñero *et al.*, 2001). Il est plus efficace lorsqu'il est situé à proximité des arbres hôtes et permet de capturer davantage les individus qui marchent que ceux qui volent (Prokopy et Wright, 1998b).

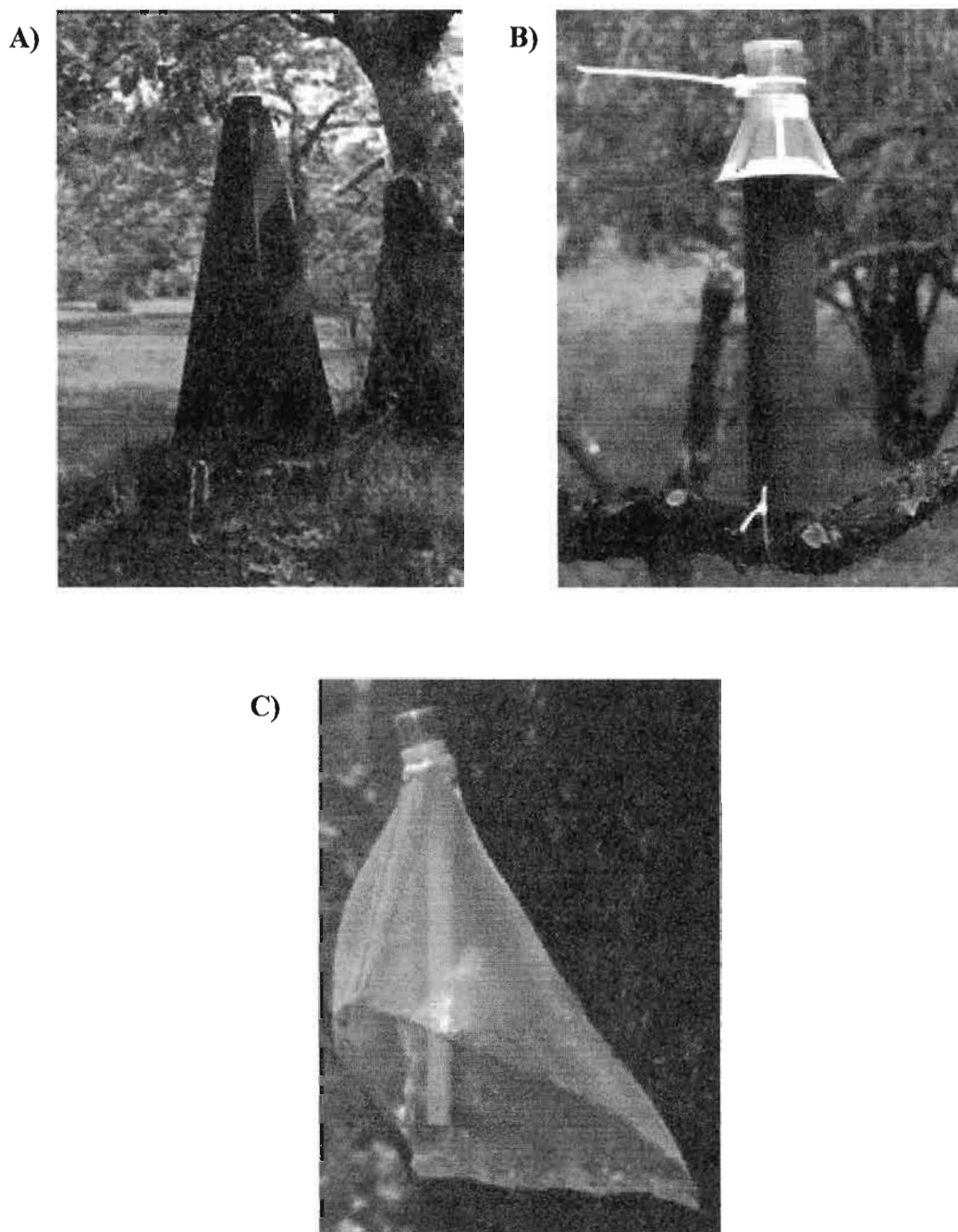


Figure 3. Principaux pièges développés pour le dépistage du charançon de la prune. A) Piège pyramidal de Tedders et Wood, B) Piège cylindrique de Leskey et Prokopy (Tracy Leskey) et C) Piège en moustiquaire. Les trois pièges sont surmontés d'une pièce collectrice développée *a priori* pour le charançon du coton (Tracy Leskey).

Le piège cylindrique (Fig. 3B) a été développé par Leskey et Prokopy (2002). Ce piège est attractif pour l'insecte car il imite une supra-branche de pommier. Il est composé d'un tuyau en chlorure de polyvinyle (PVC) surmonté d'une pièce collectrice pour le charançon du coton. Il est posé verticalement en appui sur une branche de pommier. Les insectes sont attirés de façon maximale lorsque le tuyau de PVC a un diamètre de 6 cm, une longueur de 50 cm et qu'il est attaché de façon à pointer vers le haut (Leskey et Prokopy, 2002). Parmi les couleurs au latex testées sur les cylindres (noire, jaune canari, blanc et vert foncé), aucune ne semble plus attractive que les autres (Leskey et Prokopy, 2002). Il a également été démontré que les insectes capturés par ce type de piège s'y rendent principalement en marchant sur la branche où est attaché le piège (Leskey et Prokopy, 2002).

Le piège en moustiquaire (Fig. 3C) est formé d'un cône flexible en moustiquaire métallique entourant le tronc des arbres et ayant au sommet une pièce collectrice (Mulder *et al.*, 1997). Ce piège passif a été créé pour le dépistage du charançon de la pacane. Il permet principalement de capturer les individus qui grimpent sur le tronc (Prokopy *et al.*, 2000).

Des panneaux de plexiglas transparents et collants sont aussi utilisés comme pièges pour le charançon de la prune (Prokopy *et al.*, 1998a; Dixon et Prokopy, 1999; Prokopy *et al.*, 2000). Ce piège est construit à partir d'un panneau de 60 par 60 cm et est placé sur un poteau de bois à une hauteur de 170 cm, à proximité des pommiers, la face collante positionnée en direction de la forêt avoisinante. Il est conçu pour capturer les insectes qui atteignent les arbres fruitiers en volant (Prokopy *et al.*, 2000).

La littérature fait mention de plusieurs autres types de pièges comme des sphères collantes vertes placées dans les pommiers de façon à imiter des pommettes (Yonce *et al.*, 1995), des pièges collants en carton de formes coniques et rectangulaires

(LeBlanc, 1982) et des pommes placées au sol (Racette *et al.*, 1988). Ces pièges se sont révélés moins efficaces que les autres pièges précédemment présentés (Piñero *et al.*, 2001).

Efficacité de captures des pièges

Johnson *et al.* (2002) ont démontré que le piège pyramidal et le piège en moustiquaire utilisés dans les vergers de pêchers ont un plus grand pouvoir de détection du charançon de la prune que le battage des arbres. Il a également été observé que le piège pyramidal capture significativement plus de charançons de la prune que le piège en moustiquaire en vergers de pommiers commerciaux (Prokopy *et al.*, 2000). Par contre, pour le même type de vergers, le piège cylindrique capture significativement plus de charançons que le piège pyramidal lorsque les pommiers sont petits (porte-greffe M.9). Dans la même étude en vergers abandonnés (Prokopy *et al.*, 2000), le piège pyramidal a effectué significativement plus de captures que le piège cylindrique. En termes de nombre de captures, le piège pyramidal semble donc posséder un léger avantage sur les autres pièges, ce qui a justifié son utilisation comme modèle pour la présente étude.

Le piège pyramidal en bois n'est tout de même pas considéré comme étant suffisamment fiable et efficace pour être utilisable en vergers de pommiers commerciaux. Il n'y a pas de corrélation significative et robuste entre le nombre de captures au niveau du piège et le nombre de dégâts fruitiers détectés sur les fruits échantillonnés (Prokopy *et al.*, 2000), ce qui empêche l'utilisation du piège pour mieux cibler les interventions. La littérature fait une seule mention de l'existence d'une corrélation entre ces deux observations, dans le contexte d'un verger abandonné (Prokopy *et al.*, 2000). Par contre, il existe peut-être une relation

significative positive entre le nombre de captures obtenues à un temps donné et les dégâts observés à une période ultérieure. En vergers de pêcheurs, Johnson *et al.* (2002) ont établi une corrélation ($t = 5,37$, $df = 28$, $P = 0,0001$, $R^2 = 0,51$) entre le pourcentage de nouveaux dommages sur les pêches et le nombre de charançons de la prune adultes par piège pyramidal par jour une semaine plus tôt.

Taille des pièges

Quoiqu'il existe très peu d'informations concernant l'effet de la taille des pièges sur les captures de charançons, quelques études démontrent l'existence de cet effet. Une étude comparative effectuée par Tedders et Wood (1994) sur le charançon de la pacane a démontré que pour deux pyramides ayant la même superficie, mais étant de taille différente (122 vs 91 cm), la pyramide de grande taille a capturé significativement plus d'individus. Une autre étude effectuée chez le charançon de la prune a démontré qu'un piège cylindrique fait d'un tuyau de 50 cm capture significativement plus de charançons que les pièges plus courts (12,5 et 25 cm) (Leskey et Prokopy, 2002). Lafleur *et al.* (2007) font mention que de très hauts pièges pyramidaux (244 et 366 cm) capturent moins de charançons de la prune que les pièges de taille standard (122 cm).

Positionnement du piège pyramidal en vergers

Afin d'optimiser les captures de charançons de la prune, les pièges utilisés pour son dépistage doivent être positionnés à proximité des troncs de pommiers qui sont adjacents aux boisés périphériques (Lafleur et Hill, 1987). Les pièges devraient

également être positionnés sur des cultivars de pommiers hâtifs (Lafleur et Hill, 1987).

Appâts olfactifs

Les composés olfactifs utilisés pour attirer les charançons de la prune peuvent être, soit des phéromones synthétisées sur le modèle de ceux qui sont naturellement émis par cet insecte, soit des produits volatils qui sont naturellement libérés par les arbres fruitiers hôtes de ce ravageur. Chez ce charançon, ces composés attractifs peuvent être jumelés aux différents pièges structuraux existants (Prokopy *et al.*, 2000; Piñero *et al.*, 2001; Leskey et Wright, 2004) ou à des arbres-sentinelles ensuite utilisés pour le dépistage visuel des dégâts (Prokopy, 2003; Prokopy *et al.*, 2004). Cette dernière stratégie consiste à appliquer les composés olfactifs sur certains arbres d'un verger afin de « concentrer » sur eux les marques d'oviposition (Prokopy, 2003; Prokopy *et al.*, 2004) et de limiter le dépistage visuel aux fruits de ces arbres. Chez le charançon de la prune, une phéromone synthétique d'agrégation, l'acide grandisoïque (1 mg / jour) (Eller et Bartelt, 1996), jumelée avec le benzaldéhyde (10 mg / jour), un produit volatile retrouvé naturellement chez le prunier (Piñero *et al.*, 2001), a un plus grand pouvoir attractif que chacun de ces produits pris séparément (Prokopy *et al.*, 2000; 2004; Leskey et Wright, 2004). Leskey *et al.* (2005) ont également démontré que certains produits volatils libérés par le feuillage et le bois des pruniers sont aussi efficaces que le benzaldéhyde lorsqu'ils sont utilisés en combinaison avec l'acide grandisoïque.

Bien que les premières tentatives visant à jumeler un composé attractif synthétique à un piège (Prokopy *et al.*, 2000) n'aient pas permis de révéler l'attractivité de ces composés, des études plus récentes (Piñero *et al.*, 2001; Leskey *et*

al., 2004) ont permis de démontrer que certains pièges (piège pyramidal en bois et panneau en plexiglas clair) capturaient davantage d'insectes lorsqu'appâtés d'un mélange d'acide grandisoïque et de benzaldéhyde. Quoique la présente étude ne considère pas l'utilisation d'odeurs attractives, ces composés olfactifs pourraient éventuellement être utilisés conjointement avec les résultats obtenus dans ce projet de maîtrise afin de maximiser l'efficacité d'un piège.

EFFETS DE CERTAINS FACTEURS ABIOTIQUES SUR L'ACTIVITÉ ET LE COMPORTEMENT DU CHARANÇON DE LA PRUNE

Scotophase et photophase

Le charançon de la prune est un insecte dont la période d'activité quotidienne varie tout au long de la saison. Des études ont démontré que ce charançon est très peu actif en début de saison. À la pleine floraison (fin mai), son activité se concentre à la fin de l'après-midi et pendant la nuit (Racette *et al.*, 1991; Chouinard *et al.*, 1992b) pour devenir presque exclusivement nocturne à la chute des pétales (début juin) (Racette *et al.*, 1990; 1991). Pour cette même période, Owens *et al.* (1982) ont démontré que le charançon de la prune était actif le jour, mais ils n'ont effectué aucunes observations de nuit. Plus la saison progresse, plus l'insecte acquiert un patron d'activités qui empiète sur le jour jusqu'à l'apparition des fruits (mi-juin) où il est actif tout au long de la journée (Racette *et al.*, 1990; 1991). Le charançon de la prune est tout de même considéré comme étant principalement nocturne (Racette *et al.*, 1990; 1991).

Il a été également démontré que certaines périodes de la journée sont davantage propices à certaines activités quotidiennes de l'insecte. Durant la période couvrant le

stade pleine floraison (fin mai) jusqu'à 22 jours après la nouaison, le charançon a tendance à se déplacer de façon accrue en volant ou en marchant et se nourrir entre 18h00 et 00h00 (Chouinard *et al.*, 1993).

Température

La température influence le charançon de la prune au niveau du développement des individus (Lan *et al.*, 2004), de la longévité des adultes (McAvoy et Kok, 1999) ou par la façon de se déplacer (Prokopy *et al.*, 1999). En ce qui concerne les déplacements, Owen *et al.* (1982) concluent que le taux de mouvement chez cet insecte est positivement corrélé avec la température moyenne journalière, mais que certaines activités persistaient même à des températures froides (1 °C). Ces résultats sont corroborés par Lafleur et Hill (1987) qui ont démontré qu'au printemps, lorsque la température se situe entre 0,8 et 15,0 °C, le charançon de la prune est inactif ou se déplace lentement en marchant. Quand la température se situe entre 16 et 19 °C, une plus grande proportion de charançons se déplace en marchant plutôt qu'en volant (Prokopy *et al.*, 1999; Leskey et Prokopy, 2002). Entre 20 et 30 °C, une plus grande proportion de cet insecte se déplace en volant (Prokopy *et al.*, 1999; Leskey et Prokopy, 2002). Au-delà de 30 °C, les deux types de déplacements sont aussi fréquents l'un que l'autre (Prokopy *et al.*, 1999). Durant la période d'invasion des pommiers, le charançon de la prune se déplace vers le sol probablement à cause de la brusque baisse de la température (Lafleur et Hill, 1987; Racette *et al.*, 1991; Smith et Flessel, 1968).

Quelques études ont été publiées sur des modèles bio-climatiques permettant de décrire l'activité nocturne des charançons de la prune dans les vergers, en fonction de la température (Chouinard *et al.*, 2002) ou pour déterminer la période d'émergence

printanière des insectes (Lan *et al.*, 2004). D'autres modèles, comme celui de Reissig *et al.*, (1998), permettent la détermination d'une date optimale pour l'inspection visuelle des fruits ou pour appliquer un agent de contrôle (Chouinard *et al.*, 2002).

L'effet de la température peut également influencer l'efficacité des pièges. Ainsi, Prokopy et Wirth (1997a; 1997b) ont démontré que le piège pyramidal utilisé avec un appât olfactif atteint son optimal de captures à 18 °C.

Vent

Lorsque le charançon de la prune se retrouve en verger sous des conditions où la vitesse du vent est très faible (entre 0 et 1 km/h), une plus grande proportion d'individus volent (Prokopy *et al.*, 1999) plutôt que marchent. Au delà de cette vitesse (> 1 km/h), le faible nombre d'observations récoltées par l'auteur n'a pas permis de calculer des proportions, mais laisse supposer que le vol est plus fréquent lorsque la vitesse est très faible (Prokopy *et al.*, 1999). Il a également été démontré que ce charançon est davantage présent dans les arbres lorsque le vent a chuté (Chouinard *et al.*, 1992b; Racette *et al.*, 1991).

La littérature traitant du vent en rapport avec le charançon de la prune est peu abondante. Le vent est toutefois considéré comme étant le second facteur en importance affectant le vol du charançon du coton après la température (Sappington et Spurgeon, 2000). Le charançon du coton est un insecte qui ne possède pas un vol très puissant (McKibben *et al.*, 1988; 1991) comme le charançon de la prune (LeBlanc, 1982). Il a également été démontré qu'il existe une relation négative entre la vitesse du vent et le nombre de charançons du coton capturés dans des pièges à phéromones (Sappington et Spurgeon, 2000). Cette expérimentation a démontré que

la diminution observée du nombre d'individus capturés lorsque la vitesse du vent était élevée était due à la difficulté pour l'insecte de voler sous ces conditions. Ces résultats ont été confirmés par d'autres chercheurs (Rummel et Bottrell, 1976; Carroll et Rummel, 1985; John *et al.*, 1992) qui ont démontré que la vitesse du vent engendre des fluctuations de captures de charançons du coton.

Pluie

Les seules informations publiées à ce sujet stipulent que l'émergence printanière du charançon de la prune n'est possible qu'à la suite de trois à quatre jours de conditions climatiques favorables incluant des précipitations (Garman et Zappe, 1929; Bobb, 1949; Lathrop, 1949). Aucune publication ne fait mention de l'efficacité des pièges à charançons lorsqu'il pleut ou à la suite d'averses. Chez le charançon du coton, on mentionne que les précipitations auraient probablement un effet sur la variation journalière des captures (Rummel et Bottrell, 1976; Guerra, 1983; Rummel *et al.*, 1987). Chouinard (comm. Personnelle) a remarqué que la pluie semblait stimuler le déplacement des adultes sur les branches de pommiers.

Humidité relative

Prokopy *et al.* (1999) a démontré que le niveau d'humidité relative de l'air influence les déplacements effectués par le charançon de la prune. Lorsque le niveau d'humidité relative se situe entre 20 et 30 %, une plus grande proportion de ce ravageur se déplace en volant. Par contre, les réponses sont variables pour des valeurs situées entre 50 et 79 % d'humidité relative. Chouinard *et al.* (1994) ont également démontré que l'inactivité des charançons est positivement corrélée à une diminution

du taux d'humidité relative et à une augmentation du déficit de saturation de l'air (une fonction de la température et de l'humidité qui représente la capacité d'assèchement de l'atmosphère).

Interactions entre les facteurs abiotiques

Quoique les facteurs abiotiques aient été discutés séparément les uns des autres, il serait erroné de penser qu'ils agissent de façon indépendante. Plusieurs interactions ont été observées par plusieurs chercheurs et ont fait l'objet d'études. Par exemple, l'émergence printanière des charançons de la prune se produit lorsqu'un seuil de température est atteint et qu'il est précédé de précipitations (Bobb, 1949; Garman et Zappe, 1929; Lathrop, 1949). Le même genre de relation existe chez d'autres Curculionidae. La relation entre la température, la vitesse du vent et les migrations de masse vers les récoltes est également décrite pour *Sitona lineatus* L. (Coleoptera : Curculionidae) (Landon *et al.*, 1997).

Les études en conditions naturelles concernant l'effet des facteurs météorologiques sur le comportement et sur le piégeage du charançon de la prune ont toutefois été réalisées sans avoir préalablement contrôlé ces facteurs météorologiques. Ces facteurs ont été examinés *a posteriori*.

OBJECTIFS ET HYPOTHÈSES

Divers facteurs contrôlables et incontrôlables peuvent influencer les captures du charançon de la prune observées en vergers dans les pièges. Les facteurs contrôlables font référence aux types de pièges utilisés et les matériaux servant à leur construction.

Les facteurs non contrôlables font référence aux facteurs météorologiques observés dans les vergers.

Chapitre I

Objectif 1 : Tester en conditions contrôlées, différents matériaux (facteurs contrôlables) constituant des pièges pyramidaux.

Hypothèse 1 : Le piège en géotextile, en moustiquaire ou en CoroplastTM capturera plus d'individus que le piège de référence (en bois).

Justification : ces matériaux alternatifs sont moins chers, plus pratiques que le bois mais n'ont jamais été évalués comme alternative pour la construction de pièges. On sait par ailleurs que des matériaux de caractéristiques différentes (couleur, rugosité, etc.) capturent des nombres différents d'adultes (Prokopy *et al.*, 2000 ; Tedders et Wood, 1994)

Objectif 2 : Identifier et mesurer l'effet de divers facteurs météorologiques (facteurs abiotiques non contrôlables) sur l'efficacité de captures du piège pyramidal.

Hypothèse 1 : Davantage d'individus sont capturés par le piège pyramidal durant la scotophase que pendant la photophase.

Justification : Le charançon de la prune est plutôt nocturne (Racette *et al.*, 1992).

Hypothèse 2 : Plus la température testée est élevée, plus le nombre d'individus retrouvés au niveau de la pièce collectrice du piège pyramidal est grand.

Justification : Lorsque la température est fraîche (entre 0,8 et 15 °C), le charançon de la prune se déplace peu ou pas (Lafleur et Hill, 1987) et le taux de mouvement chez cet insecte est positivement corrélé avec la température moyenne journalière (Owen *et al.*, 1982).

Hypothèse 3 : La présence de vent nuit aux captures de charançons effectuées par le piège pyramidal.

Justification : Le charançon de la prune est présent dans les arbres surtout lorsque le vent a chuté (Chouinard *et al.*, 1992b; Racette *et al.*, 1991). Le vent est considéré comme étant le second facteur en importance affectant le vol du charançon du coton (Sappington et Spurgeon, 2000). Le charançon du coton est un insecte qui ne possède pas un vol très puissant (McKibben *et al.*, 1988; 1991) tout comme le charançon de la prune (LeBlanc, 1982).

Hypothèse 4 : Les précipitations causent une augmentation du nombre de charançons capturés avec le piège pyramidal.

Justification : L'inactivité des charançons est positivement corrélée avec une diminution du taux d'humidité relative (Chouinard *et al.*, 1993) et les précipitations ont probablement un effet sur la variation journalière des captures du charançon du coton (Rummel et Bottrell, 1976 ; Guerra, 1983 ; Rummel *et al.*, 1987)

Objectif 3 : Identifier les différences de captures entre mâles et femelles avec le piège pyramidal.

Hypothèse 1 : Le nombre de femelles capturées dans la pièce collectrice est supérieur au nombre de mâles.

Justification : Les femelles se déplacent plus vite et sur une plus grande distance dans le verger (Lafleur *et al.*, 1987) et dans les pommiers (Chouinard *et al.*, 1993) lorsqu'on les compare avec les mâles.

Chapitre II

Objectif 1 : Évaluer en vergers, les captures saisonnières obtenues par le piège pyramidal de taille standard et miniature construits en bois.

Hypothèse 1 : Une plus grande quantité de charançons est capturée en vergers avec le piège pyramidal de taille standard qu'avec le piège miniature.

Justification : Le piège pyramidal de taille standard se rapproche davantage de la taille du tronc d'un pommier.

Objectif 2 : Déterminer s'il existe une relation entre le nombre de captures et les dégâts observés pour le piège de taille standard et la version miniature.

Hypothèse 1 : Il existe une relation positive entre le nombre de captures et les dégâts observés pour le piège de taille standard et la version miniature.

Justification : En vergers de pêchers, Johnson *et al.* (2002) ont établi une corrélation entre le pourcentage de nouveaux dommages sur les pêches et le nombre de charançons de la prune adultes par piège pyramidal par jour.

CHAPITRE I

ABIOTIC FACTORS AND TRAP DESIGN MODULATE THE PERFORMANCE OF TRAPS USED TO MONITOR THE PLUM CURCULIO, *CONOTRACHELUS NENUPHAR* (HERBST).

ABSTRACT

All published studies on effects of abiotic factors on plum curculio adults, *Conotrachelus nenuphar* (Hersbt), have taken a retrospective approach. Here we present the results of experiments where factors and their levels were determined and controlled *a priori*. We compared the effectiveness of miniature pyramidal traps (45 x 20 x 20 cm) constructed of four kind of materials, i.e. wood, geotextile, nylon screening and corrugated plastic, to monitor overwintered and summer adults of univoltine plum curculio. We also studied the effects of photoperiod, temperature, wind and rain on pyramidal trap effectiveness. The experiments were done in two controlled chambers that were divided into four sections, corresponding to simulated combinations (wind or no wind / rain or no rain). The temperatures tested (15, 20 and 25 °C) were randomly assigned in the chambers.

During scotophase, geotextile traps caught significantly more overwintered and summer adults than traps made of other materials. The maximum proportion of captures (for overwintered and summer adults) during photophase was obtained at 25 °C and was significantly different than captures at 15 and 20 °C. During scotophase significantly more overwintered and summer plum curculios were caught at 20 and 25 °C than at 15 °C. Our experiments demonstrated that geotextile is a good alternative to wooden pyramidal trap. Our results suggest that captures were higher 1) at night, 2) during warmer periods (20 and 25 °C), 3) when wind velocity was low and 4) during or shortly after rainfall, and 5) that photoperiod is a factor having an important predictive value for plum curculio captures.

RÉSUMÉ

Toutes les études publiées à ce jour concernant l'effet des facteurs abiotiques sur le charançon de la prune, *Conotrachelus nenuphar* (Herbst), ont été effectuées *a posteriori*. Cet article présente les résultats d'une expérience où les facteurs abiotiques étudiés et leurs niveaux ont été déterminés et contrôlés *a priori*. L'efficacité de captures des pièges pyramidaux miniatures (45 X 20 X 20 cm) construits à partir de quatre matériaux différents, i.e. en bois, en géotextile, en moustiquaire de nylon et en plastique, ont été comparés afin de dépister les charançons de la prune adultes univoltines (souche du nord), matures et immatures sexuellement. Nous avons également étudié l'effet de la scotophase et photophase, la température, le vent et la pluie sur l'efficacité des pièges. L'expérimentation a été effectuée, en conditions contrôlées, dans deux chambres qui ont été divisées en quatre sections, chacune correspondant aux combinaisons de facteurs simulés (avec ou sans vent / avec ou sans pluie). Les températures testées (15, 20 et 25 °C) ont été assignées aléatoirement aux deux chambres.

Durant la scotophase, le piège fait de géotextile a capturé significativement plus d'individus matures et immatures sexuellement que les autres pièges constitués des matériaux testés. Durant la photophase, la proportion de captures (adultes matures et immatures) maximales a été obtenue à 25 °C et est significativement différente des captures obtenues à 15 et à 20 °C. Durant la scotophase, significativement plus de charançons de la prune matures et immatures ont été capturés à 20 et à 25 °C qu'à 15 °C. Les résultats démontrent que le piège en géotextile est une bonne alternative au piège fait en bois. Les résultats suggèrent que les captures sont plus élevées: 1) durant la nuit, 2) durant une période chaude (20 et 25 °C), 3) quand la vitesse du vent est faible et 4) durant ou peu après une averse et 5) la photopériode est un facteur qui a une valeur de prédiction importante pour les captures de charançons de la prune.

1.1 INTRODUCTION

The plum curculio, *Conotrachelus nemophar* (Herbst), is one of the most important insect pests of stone and pome fruit in Eastern North America (Racette *et al.*, 1992; Vincent *et al.*, 1999). There are two strains of plum curculio, a southern strain that is multivoltine and a northern strain that is univoltine (Racette *et al.*, 1992). In unsprayed apple orchards, damage by the northern strain may spoil over 85 % of fruit at harvest (Vincent and Roy, 1992). Adults may be controlled with sprays of organophosphate insecticides applied at the petal fall stage and 8-10 days later, notably at the periphery of orchards (Chouinard *et al.*, 1992a; Vincent *et al.*, 1997).

There have been several attempts to develop monitoring tools for adults to determine optimal timing of insecticide treatments (Vincent *et al.*, 1999). Fruit examination (Hoyt *et al.*, 1983) consists of detecting egg-laying scars on fruit in May and June. It is effective (using a threshold of 1 % damaged fruit) only if repeated frequently (Vincent *et al.*, 1997). Limb jarring consists of beating apple trees with a stick to dislodge adults (Scott and Quaintance, 1911). Its accuracy depends on cultivar, tree shape, time of the day and scout expertise (Racette *et al.*, 1990). Several trap models have been tested, i.e. the pyramidal trap (Teddars and Wood, 1994; Johnson *et al.*, 2002; Leskey, 2006), the Circle trap (Mulder *et al.*, 1997; Johnson *et al.*, 2002), the sticky clear Plexiglas panel (Dixon and Prokopy, 1999), the cylinder trap (Leskey and Prokopy, 2002; Leskey, 2006) and pyramidal traps of various size (Lafeur *et al.*, 2007). Prokopy *et al.* (2004) also used odor-baited trap trees to detect plum curculio in orchard. Prokopy *et al.* (2000) compared four trap models (e.g. Circle trap, cylinder trap, wooden pyramidal trap and sticky clear Plexiglas) and demonstrated that the wooden pyramidal trap usually catches more adults than other trap models. However, no trap models are considered effective and reliable for use in commercial orchards (Prokopy *et al.*, 2000).

Several behavioral studies have been done to determine the influence of weather on dispersal (Lafleur *et al.*, 1987; Lafleur and Hill, 1987) and field activity (Chouinard *et al.*, 1993) of plum curculio adults. Temperature has also been used to develop predictive models for plum curculio development and emergence (Lan *et al.*, 2004), nocturnal activity (Chouinard *et al.*, 2002) or optimal time for visual inspection of orchards (Reissig *et al.*, 1998). None of these studies reliably quantified the effects of abiotic factors such as rainfall, wind velocity, light intensity, temperature and combinations of these factors on trap captures. However, Prokopy and Wirth (1997a; 1997b) stated that wooden pyramidal trap have optimal captures at 18 °C. All published studies concerning the effect of abiotic factors on plum curculio behavior or trapping were done *a posteriori*, i.e. without control of the factors. Conflicting results about the effect of abiotic factors are thus frequently found in the literature.

Here we report on the response of the northern strain of plum curculio to three experiments where factors and their levels were chosen and controlled *a priori*. We distinguished two types of factors. The former are factors as trap shape or material in which they can be made of, while the latter concerns weather-related parameters (i.e. period of the day (scotophase and photophase), temperature, wind and rain). Our study has been done with adults of the northern strain. One objective was to identify materials used in the construction of pyramidal traps that would maximize captures of overwintered (experiment 1) and summer (experiment 2) plum curculios. A second objective was to determine the impact of several weather factors (day period, temperature, wind and rainfall) on the number of overwintered (experiment 1) and summer (experiment 2) insects. We also evaluated if there were differences between male and female captures for overwintered (experiment 1) and summer (experiment 2) adults. Temperatures lower than those tested in experiments 1 and 2 were tested with overwintered insets in experiment 3.

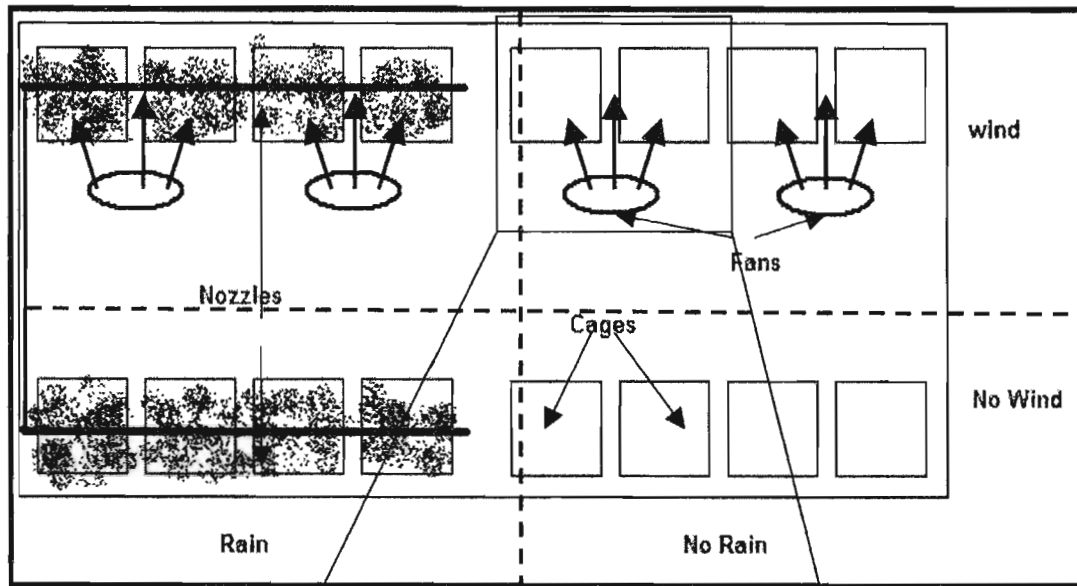
1.2 MATERIALS AND METHODS

1.2.1 Experiment 1 – overwintered adults

Weather factors This study was carried out in June 2004 simultaneously in two controlled chambers. Sixteen cages (76 x 50 x 50 cm) constructed with a wooden frame covered with a nylon screening were positioned in each chamber. The distance between each cage was 8 cm.

In a first chamber (2.0 x 6.4 x 2.1 m), photophase was simulated with fluorescent light (height: 1.46 m; light intensity: 44-86 Lux on the floor (with-without cages). In a second chamber (2.1 x 3.9 x 2.4 m), scotophase was simulated by shutting off all lights (1 lux on the floor) except a sentinel light that provided 10 lux in cages during data collection. Each chamber was divided in four sections (Fig. 4A) to encompass all combinations of wind (wind or no wind) and rain (rain or no rain). Wind was simulated by a dual fan system: one high velocity industrial fan (Lakewood Eng. Et MFG, China, model: HV-12) and one fan with a swivel head (Forest air, China, model: 13-07001) positioned in front of two cages (Fig. 4B) to generate a fluctuating wind (velocity range in the middle of the cage at half of height = 0.5 - 6 m/s). Rain was simulated with an automatic nozzle system positioned over the cages in the two rain sections (Fig. 4A). The nozzle delivered 200 ml of water for 10 s over each cage every 4 h.

A)



B)

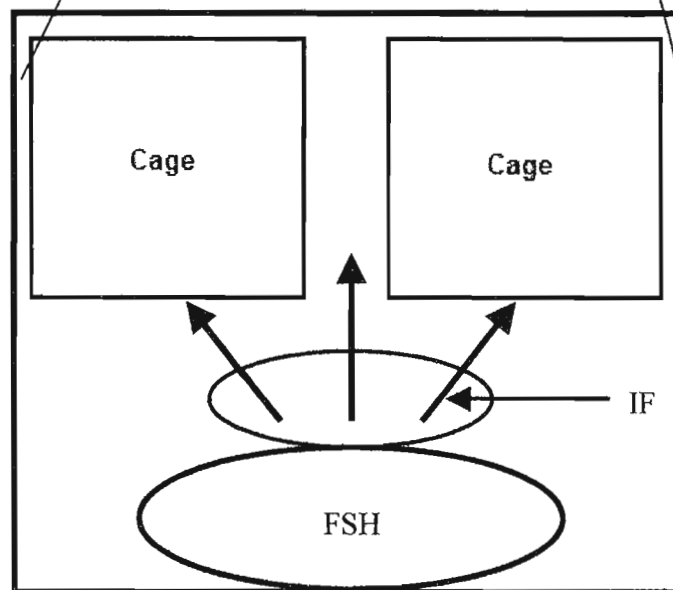


Figure 4. A) Experimental set up in a controlled chamber and B) detail of dual fan system. IF = Industrial Fan and FSH = Fan with swivel head.

Average (1996-2004) weather parameters measured from May to August in an experimental orchard of Agriculture and Agri-Food Canada at Frelighsburg, Quebec, were used to determine the summer temperatures to be tested, i.e. 15, 20 and 25 °C. The three temperatures assigned to each replicate and applied simultaneously in the two chambers. Seven replicates were performed for each temperature, i.e. 21 experimental days.

Trap material Pyramidal traps were miniature versions (45 x 20 x 20 cm) of those experimentally used to monitor plum curculio in apple orchards (122 x 55 x 55 cm). They were constructed with four kinds of materials. Except for size, black-painted wooden (plywood, thickness = 8 mm) pyramids and black corrugated plastic (CoroplastTM, polypropylene, thickness = 14 mm) pyramids were constructed as described by Tedders and Wood (1994). Black nylon screening (mesh size = 1 mm) and dark brown geotextile (polypropylene material) traps were constructed with pieces of material pasted on pyramidal-shaped frames made from wooden sticks (thickness = 8 mm). Each trap was topped with a cone-shaped boll weevil trap top assembly to capture plum curculios. The four materials were tested simultaneously in each section of the chambers (one trap type per cage) and their position was randomly determined for each replicate.

Plum curculios In June 2003, aborted apples containing plum curculio larvae were collected from the ground of an unsprayed orchard of Saint-Bruno, Qc, and put in emergence cages. In October 2003, the emerged adults were placed in overwintering cages in a nearby forest and were retrieved in spring 2004 following a method adapted from Chouinard *et al.* (1992b).

Before the experiments, adults were sexed according to Thomson (1932) and males were labeled with yellow paint on their elytra (Acrylic Paint mim Taniya Color, Aliso Viejo, CA, USA). Half of the adults (males and females) were placed in an incubator set under day conditions (12 h light (L): 12 h dark (D), 23 °C) three weeks before the experiment, while the other half were placed in a second incubator at 23 °C having an inverse photoperiod. Sixteen groups (corresponding to the number of experimental cages) of 20 randomly chosen insects (10 males : 10 females) were put in each incubator. Fresh apples were provided as food and replaced every two days.

Twelve hours before the beginning of each experiment, the temperature of the chambers was set and the plum curculio groups were randomly assigned to each cage. Five minutes before the beginning of the experiment, a first rainfall was simulated in the photophase chamber. The second and third rainfalls started respectively 4 and 8 h later. Plum curculio groups were positioned around each trap (Fig. 5) at 5 minute intervals. Plum curculio adults were starved at the beginning of each experimental day. The same procedure was applied for the scotophase chamber. The position and the sex of adults (dead or alive) were noted 10 h after release in each cage.

Data analysis The mean proportion of plum curculios caught in and on each cone-shaped trap top assembly for all combinations of factors was analyzed according to the GLIMMIX procedure of the SAS statistical package (Littell *et al.*, 1996, SAS Institute 2006). Procedure GLIMMIX allows the analysis of generalized linear mixed models with fixed and random effects at several levels of a variable response that does not follow a normal distribution. In our case, before beginning the analysis, we had to determine a strategy to select appropriate random effects such that negligible variance components would be excluded from the model. The data was first analyzed according to physiological state of adult plum curculios (i.e. overwintered (mature) or

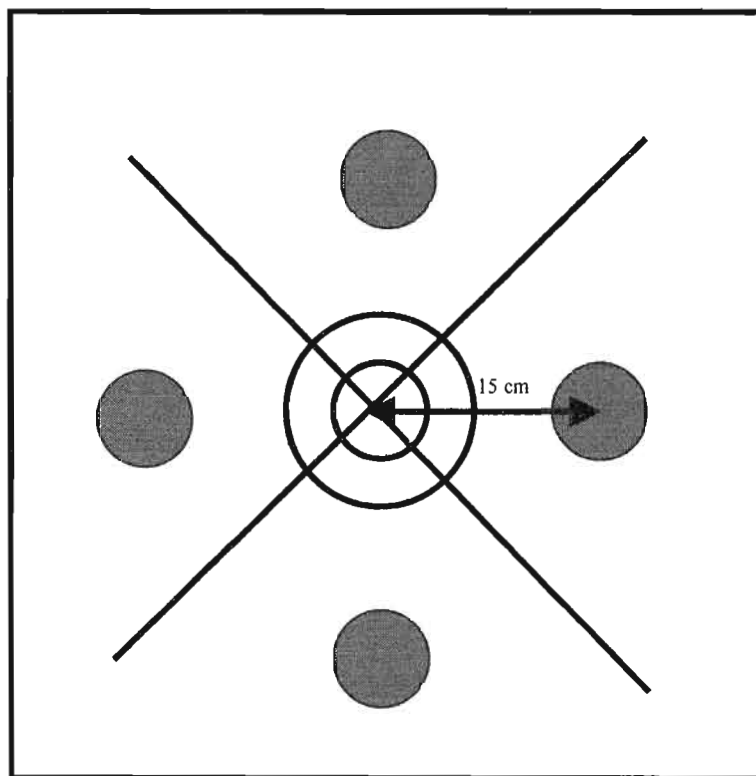


Figure 5. Top view of area where groups of plum curculios were released (grey circles) at the base of pyramidal traps (black) in each cage.

summer (immature) generation). The complete model with fixed and random effects and their interactions did not converge. By excluding statistical interactions having three factors and more, and by excluding random effects one-by-one, beginning with the most complex component having an effect on variances, we obtained convergence with the following models:

Overwintered insects

```
model R / N = temp | light | rain | wind | trap | sex @2 / ddfm=KR ;
random rep(temp)
      rep*rain(temp*light)
      rep*rain*wind(temp*light);
```

Summer insects

```
model R / N = temp | light | rain | wind | trap | sex @2 / ddfm=KR ;
random rep(temp)
      rep*light(temp)
      rep*rain(temp*light)
      rep*wind(temp*light)
      rep*rain*wind(temp*light);
```

Fixed effects were computed with procedure LSMEANS, such that the conclusions apply only to each physiological state. The statistical model allowed testing of photoperiod, temperature, wind, rain, sex or trap material as main effects on plum curculio captures and testing of statistical 2-way interactions between these factors. A Student's t-test with the Tukey correction was used to locate differences among means.

1.2.2 Experiment 2 - summer adults

In October 2004, the protocol and the statistical analysis of experiment 1 were used with summer adults that emerged from fallen apples collected in June 2004 in the orchard of Saint-Bruno, Qc.

1.2.3 Experiment 3 - overwintered adults, low temperatures

In June 2005, the protocol of experiment 1 was used with the following modifications. In June 2005, the four traps tested in each section were built only with black-painted wood. The temperatures tested were 5, 10 and 15 °C. Overwintered (sexually mature) plum curculios emerged from apples collected in June 2004 and put in overwintering cages in October 2004.

Data analysis Because the data did not follow a normal distribution, the mean proportions of plum curculios caught in and on each cone-shaped trap were statistically analyzed with a Poisson regression (McCullagh and Ûnelder, 1987) to determine if there was a temperature effect on adult captures. T-test was used to locate differences among the means.

1.3 RESULTS

1.3.1 Experiment 1 and 2- overwintered and summer adults

Weather factors The effect of photoperiod was significant for overwintered ($F = 840.81$, $df = 1$, 217.5 , $p < 0.0001$) and summer ($F = 419.71$, $df = 1$, 50.17 , $p < 0.0001$) plum curculios. The mean proportion of overwintered ($t = 29.0$, $df = 217.5$, $p < 0.0001$) and summer ($t = 20.49$, $df = 50.17$, $p < 0.0001$) plum curculios caught by traps during scotophase was significantly higher than during photophase (Fig. 6A).

The effect of temperature was also significant for overwintered ($F = 86.34$, $df = 2$, 34.77 , $p < 0.0001$) and summer ($F = 86.84$, $df = 2$, 25.61 , $p < 0.0001$) adults. The mean proportion of insects caught by the traps (Fig. 6B) was significantly higher at 25 °C than at 15 °C (overwintered: $t = 12.88$, $df = 65.04$, $p < 0.0001$; summer: $t = 13.17$, $df = 51.85$, $p < 0.0001$) and 20 °C (overwintered: $t = 6.57$, $df = 20.08$, $p < 0.0001$; summer: $t = 3.74$, $df = 14.59$, $p = 0.0020$). The traps also caught a significantly larger proportion of adults at 20 °C than at 15 °C (overwintered: $t = 7.63$, $df = 77.72$, $p < 0.0001$; summer: $t = 10.37$, $df = 53.33$, $p < 0.0001$) (Fig. 6B).

Statistical interaction between photoperiod and temperature was also observed for overwintered ($F = 55.27$, $df = 2$, 124.6 , $p < 0.0001$) and summer ($F = 68.88$, $df = 2$, 29.12 , $p < 0.0001$) adults. The mean proportion of insects caught during photophase (Fig. 7) was significantly higher at 25 °C than at 15 °C (overwintered: $t = 12.46$, $df = 446.9$, $p < 0.0001$; summer: $t = 14.28$, $df = 245.8$, $p < 0.0001$) and 20 °C (overwintered: $t = 8.24$, $df = 104.6$, $p < 0.0001$; summer: $t = 5.52$, $df = 32.7$, $p < 0.0001$). The traps caught a larger proportion of plum curculios at 20 °C than at 15 °C

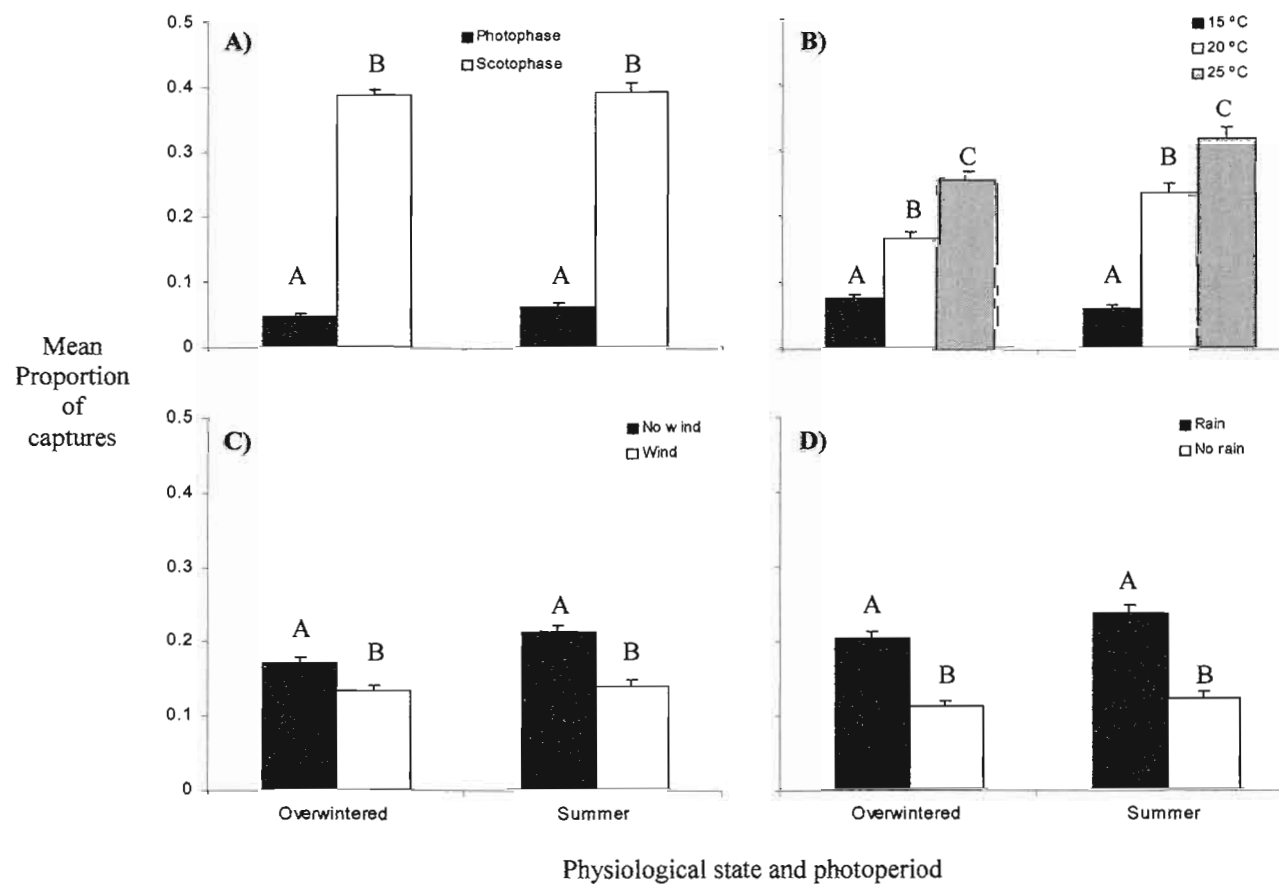


Figure 6. A) Mean proportion (\pm SE) of plum curculios caught by pyramidal traps during scotophase and photophase conditions, B) at 15, 20 and 25 °C, C) under wind and D) under rain conditions in relation to plum curculio physiological state. Within a physiological state, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).

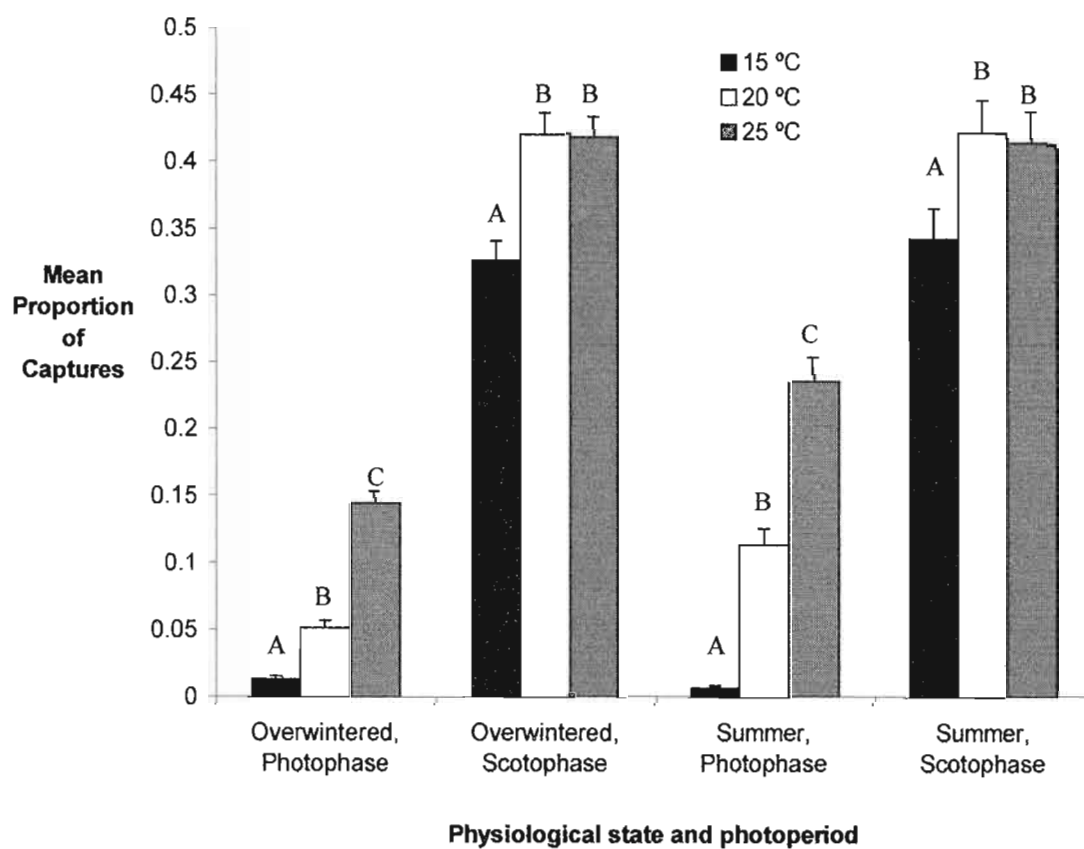


Figure 7. Mean proportion (\pm SE) of plum curculios caught by pyramidal traps at 15, 20 and 25 °C in relation to their physiological state and photoperiod. In a given physiological state and photoperiod, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).

(overwintered: $t = 6.55$, $df = 541.9$, $p < 0.0001$; summer: $t = 10.83$, $df = 255.3$, $p < 0.0001$). During scotophase (Fig. 7), the traps at 20 °C (overwintered: $t = 4.23$, $df = 27.96$, $p = 0.0002$; summer: $t = 2.33$, $df = 23.47$, $p = 0.0298$) and 25 °C (overwintered: $t = 4.11$, $df = 27.84$, $p = 0.0003$; summer: $t = 2.07$, $df = 23.56$, $p = 0.0491$) caught more insects than at 15 °C.

There was a significant effect of wind ($F = 17.73$, $df = 1$, 134.7 , $p < 0.0001$) and rain ($F = 85.45$, $df = 1$, 93.57 , $p < 0.0001$) for overwintered plum curculios. The same significant effects were also observed for summer adults (wind: $F = 76.03$, $df = 1$, 47.1 , $p < 0.0001$; rain: $F = 143.44$, $df = 1$, 30.48 , $p < 0.0001$). The traps caught significantly more adults when the wind blew (Fig. 6C) (overwintered: $t = 4.21$, $df = 134.7$, $p < 0.0001$; summer: $t = 8.72$, $df = 47.1$, $p < 0.0001$) and when it rained (Fig. 6D) (overwintered: $t = 9.24$, $df = 93.57$, $p < 0.0001$; summer: $t = 11.98$, $df = 30.48$, $p < 0.0001$).

Sex The effect of sex was not significant for overwintered insects but significant for summer adults ($F = 17.60$, $df = 1$, 1307 , $p < 0.0001$). The traps (Fig. 8A) caught a larger proportion of summer females than males ($t = 4.20$, $df = 1302$, $p < 0.0001$). There was a significant interaction between photoperiod and sex for overwintered insects ($F = 6.06$, $df = 1$, 1302 , $p = 0.0139$). Under scotophase (Fig. 8B), the traps caught significantly ($t = 2.71$, $df = 1302$, $p = 0.0067$) fewer females than males. However, there were no significant differences during photophase.

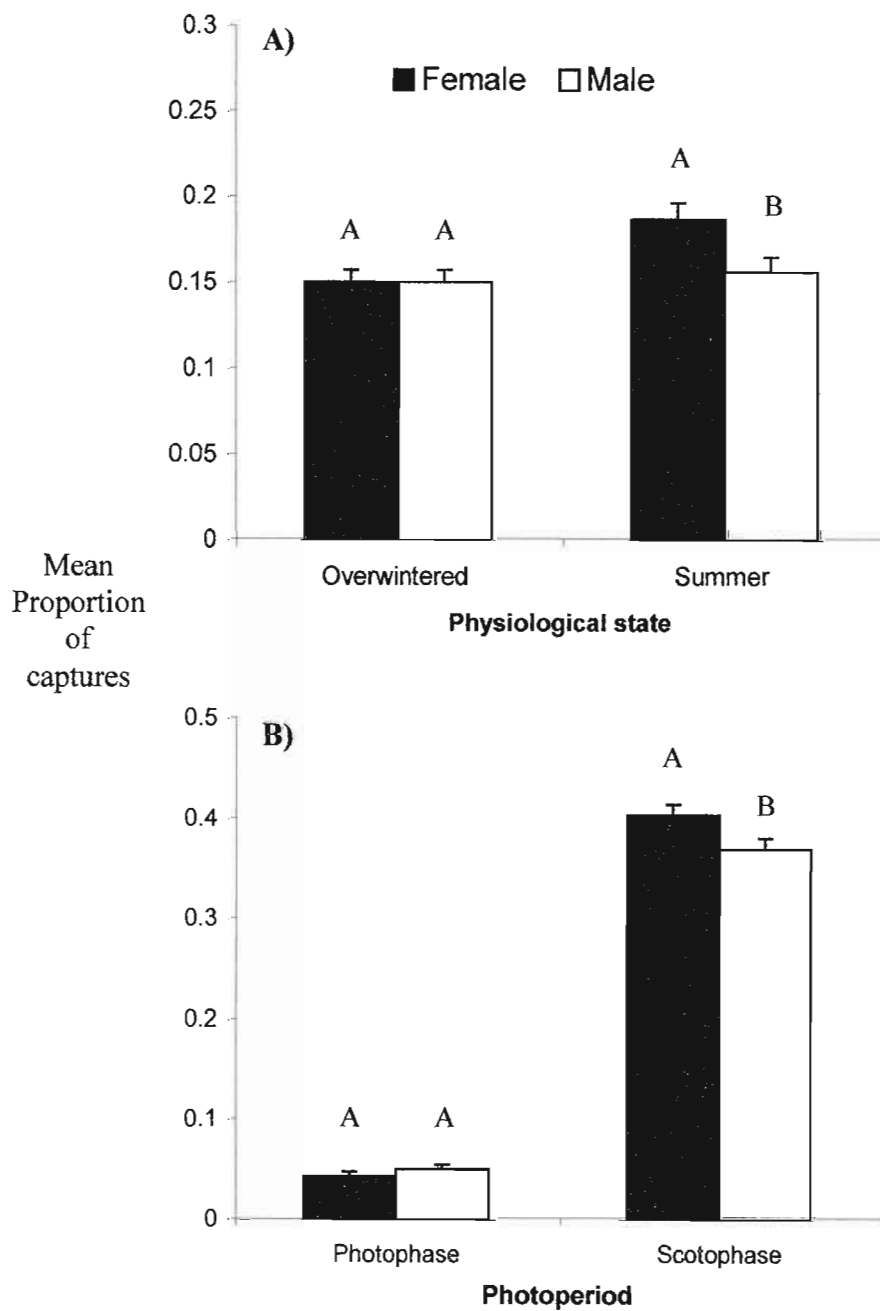


Figure 8. A) Mean proportion (\pm SE) of males and female plum curculios caught by pyramidal traps in relation to their physiological state. B) Mean proportion (\pm SE) of male and female overwintered insects in relation to photoperiod. In a given physiological state or photoperiod, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).

Trap material The interaction between material and photoperiod was significant for overwintered ($F = 7.86$, $df = 3$, 1302 , $p < 0.0001$) and summer ($F = 5.52$, $df = 3$, 1302 , $p = 0.0009$) adults. During photophase (Fig. 9A), pyramidal traps made of plastic caught significantly more overwintered plum curculios than traps made with other materials (wood: $t = 3.08$, $df = 1302$, $p = 0.0021$; geotextile: $t = 2.83$, $df = 1302$, $p = 0.0047$; screen: $t = 2.07$, $df = 1302$, $p = 0.0384$). The wooden traps (Fig. 9A) caught statistically more summer insects than the other traps (geotextile: $t = 2.37$, $df = 1302$, $p = 0.0179$; screen: $t = 2.91$, $df = 1302$, $p = 0.0037$; plastic: $t = 3.55$, $df = 1302$, $p = 0.0004$). During scotophase (Fig. 9A), the mean proportion of overwintered insects caught by the geotextile traps was significantly higher than proportion of plum curculios caught by the other three materials tested (wood: $t = 4.97$, $df = 1302$, $p < 0.0001$; screen: $t = 4.24$, $df = 1302$, $p < 0.0001$; plastic: $t = 4.94$, $df = 1302$, $p < 0.0001$). The geotextile traps (Fig. 9A) caught significantly more summer adults than the other three materials tested (wood: $t = 3.91$, $df = 1302$, $p < 0.0001$; screen: $t = 4.97$, $df = 1302$, $p < 0.0001$; plastic: $t = 6.64$, $df = 1302$, $p < 0.0001$). The wooden traps (Fig. 9A) also caught statistically fewer summer insects than the plastic traps ($t = 2.77$, $df = 1302$, $p = 0.0056$).

The interaction between material and rain was significant for overwintered ($F = 5.33$; $df = 3$, 1302 ; $p = 0.0012$) and summer ($F = 5.96$; $df = 3$, 1302 ; $p = 0.0005$) plum curculios. When it rained (Fig. 9B), the geotextile (wood: $t = 3.32$, $df = 1302$, $p = 0.0009$; screen: $t = 3.67$, $df = 1302$, $p = 0.0003$) and plastic (wood: $t = 2.72$, $df = 1302$, $p = 0.0067$; screen: $t = 3.06$, $df = 1302$, $p = 0.0022$) traps caught more overwintered insects than wooden and screen traps. The wooden (screen: $t = 3.51$, $df = 1302$, $p = 0.0005$; plastic: $t = 2.00$, $df = 1302$, $p = 0.0457$) and geotextile (screen: $t = 4.74$, $df = 1302$, $p < 0.0001$; plastic: $t = 3.24$, $df = 1302$, $p = 0.0012$) traps caught more summer adults than screen and plastic pyramidal traps (Fig. 9B). In absence of rain, the screen traps caught significantly more overwintered adults than the wooden

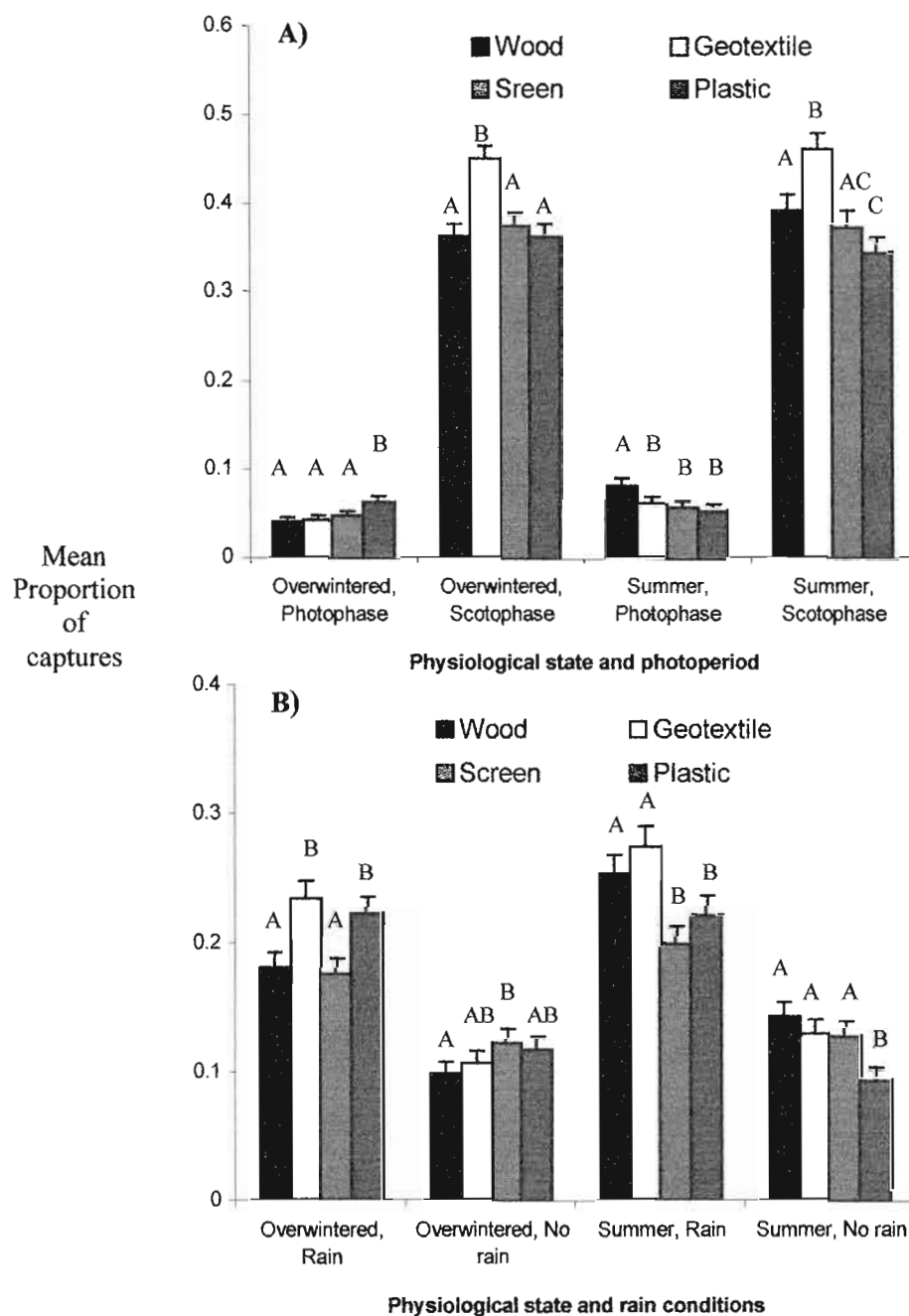


Figure 9. Mean proportion (\pm SE) of plum curculios caught by pyramidal trap materials (wood, geotextile, screen and plastic) A) in relation to their physiological state and photoperiod, and B) their physiological state and rain conditions. In a given section, bars superscribed with different letters are significantly different (ANOVA, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).

traps ($t = 2.08$, $df = 1302$, $p = 0.0374$). Plastic traps caught less summer plum curculios than traps made of other materials (wood: $t = 4.48$, $df = 1302$, $p < 0.0001$; geotextile: $t = 3.33$, $df = 1302$, $p = 0.0009$; screen: $t = 3.22$, $df = 1302$, $p = 0.0013$).

1.3.2 Experiment 3 – overwintered adults, low temperatures

There was a significant effect of temperatures on the mean proportion of overwintered plum curculios caught during photophase ($\chi^2 = 8.0$, $df = 2$, $p = 0.0124$) and scotophase ($\chi^2 = 36.6$, $df = 2$, $p < 0.0001$). During photophase (Fig. 10) the traps caught significantly more insects at 10 and 15 °C than at 5 °C. During scotophase (Fig. 10), the traps caught significantly more adults at 15 °C than 5 and 10 °C. Significantly more adults were caught at 10 °C than at 5 °C during the scotophase as well.

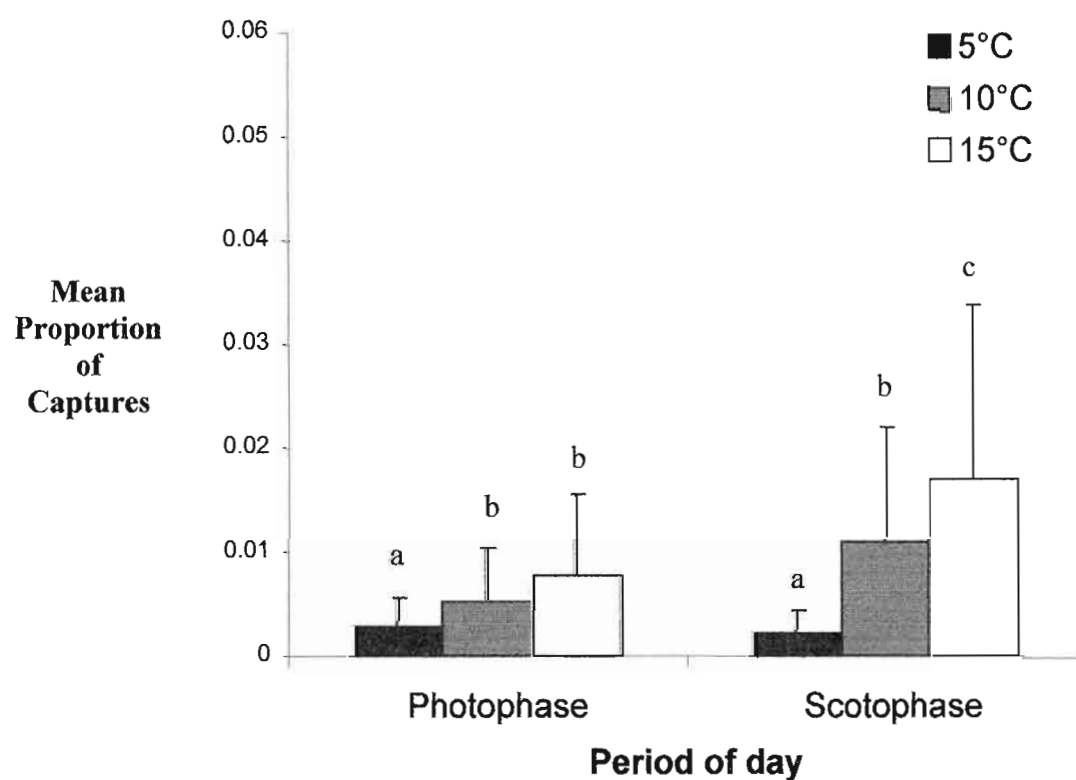


Figure 10. Mean proportion (\pm SE) of overwintered plum curculios caught by pyramidal traps at 5, 10 and 15 °C in relation to the period of the day. Within a period of day, bars superscribed with different letters are significantly different (Poisson regression, $P < 0.05$; t- test, $P < 0.05$).

1.4 DISCUSSION AND CONCLUSION

Weather factors Racette *et al.* (1990; 1991) and Chouinard *et al.* (1992b) demonstrated that plum curculio adults are mainly nocturnal. Chouinard *et al.* (1993) concluded that plum curculio mostly crawl between 18h00 and 00h00. Our results of experiments 1 and 2 also showed highest captures (ca. 40 %) of overwintered and summer adults under scotophase conditions. In addition, most significant 2-way interactions included photoperiod factor. This suggest that photoperiod is a factor having an important predictive value for plum curculio captures.

Our results for experiments 1 and 2 showed that maximum proportions of overwintered and summer plum curculio captures (ca. 42 %) peaked at 20 °C during scotophase. Our results with miniature traps agree with the optimal capture temperature (18 °C) reported by Prokopy and Wirth (1997a; 1997b) for standard pyramids. However, our experiments were not designed to quantify responses at temperatures > 25 °C: such information would be more relevant to areas where the southern strain is found. During photophase, the maximum proportion of captures (ca. 25 and 16 %) for both overwintered and summer adults was obtained at 25 °C. At 5 and 10 °C, the proportion of insects captures was low (~ 0.2 to 8 %), but increases in temperatures in the range between 5 and 25 °C resulted in increases in insect captures by traps. Those trapping results accurately reflect natural activity of plum curculio as reported by studies by Lafleur and Hill (1987), who demonstrated that plum curculio activity is low when temperatures ranged between 0.8 and 15 °C, and by several *a posteriori* studies that established a positive correlation between temperature and adult activity (Chapman, 1938; Lathrop, 1949; Racette *et al.*, 1991; Chouinard *et al.*, 1993).

Fewer overwintered or newly emerged adults were caught by pyramidal traps under windy conditions. Some behavioural field studies are in agreement with our results. For example Chouinard *et al.* (1992b) and Racette *et al.* (1991) mentioned that plum curculio climb on apple trees when there was low wind velocity or no wind. Other studies also demonstrated that several curculionid species may fly only when wind velocity is low (0-1 km/h) (McKibben *et al.*, 1988; Sappington and Spurgeon, 2000) because they are poor flyers.

In studies conducted at full bloom in apple orchards, plum curculio moved into tree canopies when humidity increased but returned to the ground when humidity decreased (Chouinard *et al.*, 1992b; Racette *et al.*, 1991; 1992). Essentially, emergence and dispersal of overwintered plum curculios were modulated by rainfall (Garman and Zappe, 1929; Lathrop, 1949). Therefore an increase in humidity or rainfall should be associated with an increase in the number of plum curculios captured if the traps accurately reflect this type of activity. Results of experiments 1 and 2 are in agreement with this explanation as they demonstrated the positive effect of rainfall on overwintered and summer plum curculio captures with pyramidal traps.

Sex Results of experiments 1 and 2 revealed that pyramidal traps generally caught significantly more females than males. Consequently, pyramidal traps were more effective for capturing the sex that chiefly causes fruit damage by oviposition.

Trap material Experiments performed between 15 and 25 °C demonstrated that geotextile pyramidal traps performed better (ca 7–11 % more captures) than wood, nylon screening and plastic traps under night conditions, e.g. when most of the trapping occurred, and under rain. They however performed less (ca 2% captures) than plastic (overwintered insets) and wooden (summer insects) traps under day conditions. Overall, the geotextile offered the best performance in terms of numbers

trapped. Geotextile traps have other advantages over wooden pyramidal traps. As geotextile is a very light material, these traps are easier to manipulate in orchards and their construction cost is lower than wooden traps. In contrast to the plastic traps where rain forms a layer of water that reduces the adherence of insects to the traps, the fibrous surface of geotextile absorbs water which preserves plum curculio adherence. Although geotextile may vibrate under windy conditions (as directly observed during our experiments), captures were relatively higher, possibly owing to its higher adherence.

To our knowledge, this is the first controlled study that considered the effects of weather factors (unmanageable factors in orchards) and material (manageable factors) of which the traps are made of on overwintered and summer plum curculio captures in pyramidal traps. Geotextile appears to be a sound alternative to wooden pyramidal trap because it caught more (7–11 %) plum curculios than other materials under night conditions. This material could be combined with baits (Prokopy *et al.*, 2000; 2004; Piñero *et al.*, 2001; Leskey and Wright, 2004) to maximize its effectiveness. Although weather factors cannot be managed, our experiments allow some practical recommendations concerning monitoring of plum curculios with pyramid traps in orchards. For example, under constant populations, trap captures may still vary according to material and weather factors and therefore population estimates would need to be adjusted according to their effect. Under the conditions of our experiments, captures were higher 1) at night, 2) during warmer periods (20 and 25 °C), 3) when wind velocity was low and 4) during or shortly after rainfall.

Acknowledgments

We thank Sylvie Bellerose, Daniel Cormier and Franz Vanoosthuyse from the Institut de recherche et de développement en agroenvironnement (IRDA) and Gaétan Racette from Agriculture and Agri-Food Canada, Horticultural Research Development Center at Saint-Jean-sur-Richelieu (AAC-HRDC), for their assistance; Guy Boulet, Bernard Goyette, Guy Lahaie, Geneviève Larouche, and Benoit Rancourt from AAC-HRDC for materials lend or for their help during the construction of various experimental devices; Éric Lucas and his team (UQAM) for scientific exchanges; Bertrand Fournier (UQAM) and for statistical assistance and M. Bernier-Cardou (Forestry Canada) and Michèle Grenier (IRDA) for advices on the GLIMMIX procedure. We specially thank Pierre Lemoyne (AAC-HRDC) for his technical input. Tracy Leskey reviewed an earlier draft of this manuscript. This research was funded by the Fonds Québécois de Recherche sur la Nature et les Technologies (FQRNT).

CHAPITRE II

EFFETS DE LA TAILLE DU PIÈGE PYRAMIDAL EN BOIS SUR LES CAPTURES DU CHARANÇON DE LA PRUNE, *CONOTRACHELUS* *NENUPHAR* (HERBST), EN VERGERS DE POMMIERS

RÉSUMÉ

Le piège pyramidal standard de 122 cm de hauteur et une réplique miniature de 45 cm ont été mis à l'essai en conditions naturelles (en vergers) afin de comparer leur niveau de captures et de vérifier si les captures sont reliées avec les dégâts observés. Les pièges ont été installés selon un dispositif paillé et relevés deux fois par semaine durant 16 semaines dans deux vergers différents en 2005 et 2006. En 2005, le piège de taille standard a connu deux pics de captures (1^{er} pic le 13 mai : 43 captures, 2^e pic les 27 et 30 juin : 187 captures). Le piège miniature a également connu deux pics de captures (1^{er} pic les 27 et 30 mai : 108 captures, 2^e pic les 7 et 10 juin : 51 captures). Le piège de taille standard a capturé significativement plus d'individus que le piège miniature durant la floraison, mais le piège miniature a significativement mieux performé après la floraison. Une relation a également été établie pour le piège de taille standard ($r^2 = 0,46$) et le piège réduit ($r^2 = 0,47$) entre les captures totales obtenues à partir de la floraison et les dégâts fruitiers observés (5 juillet). En 2006, le piège de taille standard a connu un seul pic de captures (5 mai : 50 captures) tout comme le piège miniature (5 mai : 23 captures). Durant la période précédant la floraison, le piège de taille standard a capturé significativement plus de charançons que la version miniature. Aucune relation n'a pu être établie en 2006 entre les dégâts observés (5 juillet) et le nombre de captures. Les analyses de régression effectuées soulignent que les deux tailles de pièges ont une efficacité de capture similaire mais que la version de taille réduite pourrait être favorisée car ce piège est plus léger, plus facile à manipuler et moins coûteux que le piège de taille standard. Ces mêmes analyses suggèrent qu'une population élevée et peu ou aucun traitement visant le charançon favorisent l'établissement de relations captures-dégâts. Les résultats

suggèrent également qu'un ou plusieurs facteurs inconnus joueraient un rôle dans l'établissement de relations captures-dégâts encore plus fiables.

2.1 INTRODUCTION

L'étude en conditions contrôlées (Chapitre I) de l'effet des divers facteurs météorologiques et des matériaux servant à la construction de pièges pyramidaux sur les proportions de captures du charançon de la prune, *Conotrachelus nenuphar* (Coleoptera : Curculionidae), a démontré que le piège pyramidal miniature capture significativement plus d'insectes quand le piège est fait de géotextile, durant la nuit, durant une période chaude (20 et 25 °C), quand la vitesse du vent est faible et durant (ou peu après) une averse. Par contre, cette étude ne fournit pas d'informations concernant les captures possibles en vergers, ni sur l'effet de la taille du piège sur les captures d'insectes et les relations captures-dégâts fruitiers.

Bien que l'expérimentation en conditions contrôlées (densité d'insectes, temps, espace et facteurs météorologiques simulés déterminés *a priori*) permette de mesurer plus facilement l'effet de paramètres qui agissent et interagissent parfois simultanément sur le terrain, l'expérimentation sur le terrain assure une meilleure représentativité des résultats dans le cas d'une application pratique.

Tedders et Wood (1994) ont effectué une étude sur le charançon de la pacane, *Curculio caryae* (Horn) (Coleoptera : Curculionidae), qui démontre que pour deux pyramides ayant la même superficie mais étant de taille différente (122 vs 91 cm), la pyramide de grande taille capture significativement plus d'individus. Une autre étude effectuée chez le charançon de la prune a démontré qu'un piège cylindrique fait d'un tuyau de 50 cm capture significativement plus de charançons que les pièges faits de

tuyaux plus courts (12,5 et 25 cm) (Leskey et Prokopy, 2002). Lafleur *et al.* (2007) font mention que des pièges pyramidaux de 244 et 366 cm capturent moins de charançons de la prune qu'un piège de taille standard (122 cm).

Au chapitre I, l'utilisation de modèles réduits a été nécessaire en raison de contraintes spatiales en laboratoire, mais les résultats obtenus sont-ils représentatifs de ceux qui auraient été obtenus avec des pièges de dimension standard? Deux objectifs ont été poursuivis dans le cadre de cette étude. Premièrement, on a voulu comparer la performance de captures du piège pyramidal miniature, construit en bois avec le piège de taille standard en vergers. Deuxièmement, on a voulu déterminer s'il existe une relation entre le nombre de captures et les dégâts d'oviposition observés sur les fruits des arbres.

2.2 MÉTHODOLOGIE

2.2.1 Caractéristiques générales des vergers expérimentaux

Le verger utilisé en 2005 (lieu : Rougemont; cultivars : Cortland, McIntosh et Melba) était sous régie biologique depuis plus de 5 ans. Au sud et à l'ouest du verger, on retrouvait un boisé alors qu'au nord et à l'est, on retrouvait principalement des bâtiments résidentiels sur des terrains composés de terre, de gravier ou de pelouse, situés à proximité d'une route. Les populations de charançons de la prune y étaient élevées et le taux de dommages moyens à la récolte de 2004 s'élevait à plus de 75 %. En 2006, l'expérimentation s'est déroulée dans un autre verger (lieu : Henryville; cultivars Liberty, McIntosh et Trent) sous régie biologique depuis 5 ans. Ce verger avait pour principales barrières des terres agricoles et quelques bandes forestières. Les

populations de charançons de la prune y étaient élevées et le taux de dommages moyens à la récolte s'élevait à plus de 24 % l'année précédant les essais.

2.2.2 Protocole expérimental

Le même protocole a été utilisé en 2005 et en 2006. Les pièges de taille standard (122 x 55 x 55 cm) et miniature (45x 20 x 20 cm) ont été construits en contreplaqué de bois (épaisseur : 12 mm) et peints en noir, selon la description faite par Tedders et Wood (1994). Chaque piège a été coiffé d'une pièce collectrice d'insectes développée préalablement pour le piégeage du charançon du coton, *Anthonomus grandis* Boheman (Coleoptera : Curculionidae).

Avant le début de l'expérimentation, 15 pommiers expérimentaux (cultivars McIntosh) ont été choisis au hasard parmi des arbres de taille similaire, en s'assurant de la présence d'au moins un arbre tampon entre chaque arbre choisi afin de limiter les interactions entre les unités expérimentales. Les pièges ont été positionnés autour de chacun des arbres choisis en respectant un dispositif pairé, i.e. un piège de chaque taille a été placé sous chacun des pommiers (Fig. 11). Les pièges ont été placés l'un face à l'autre à équidistance de l'axe central des troncs (30 à 50 cm selon la dimension et la forme des arbres), mais aléatoirement autour de l'axe. Afin d'éviter que les pièges soient renversés par des bourrasques de vent, ceux-ci ont été fixés au sol à l'aide de piquets. La base des pièges a été aussi apposée en contact avec le sol afin de maximiser les captures des charançons qui marchaient.

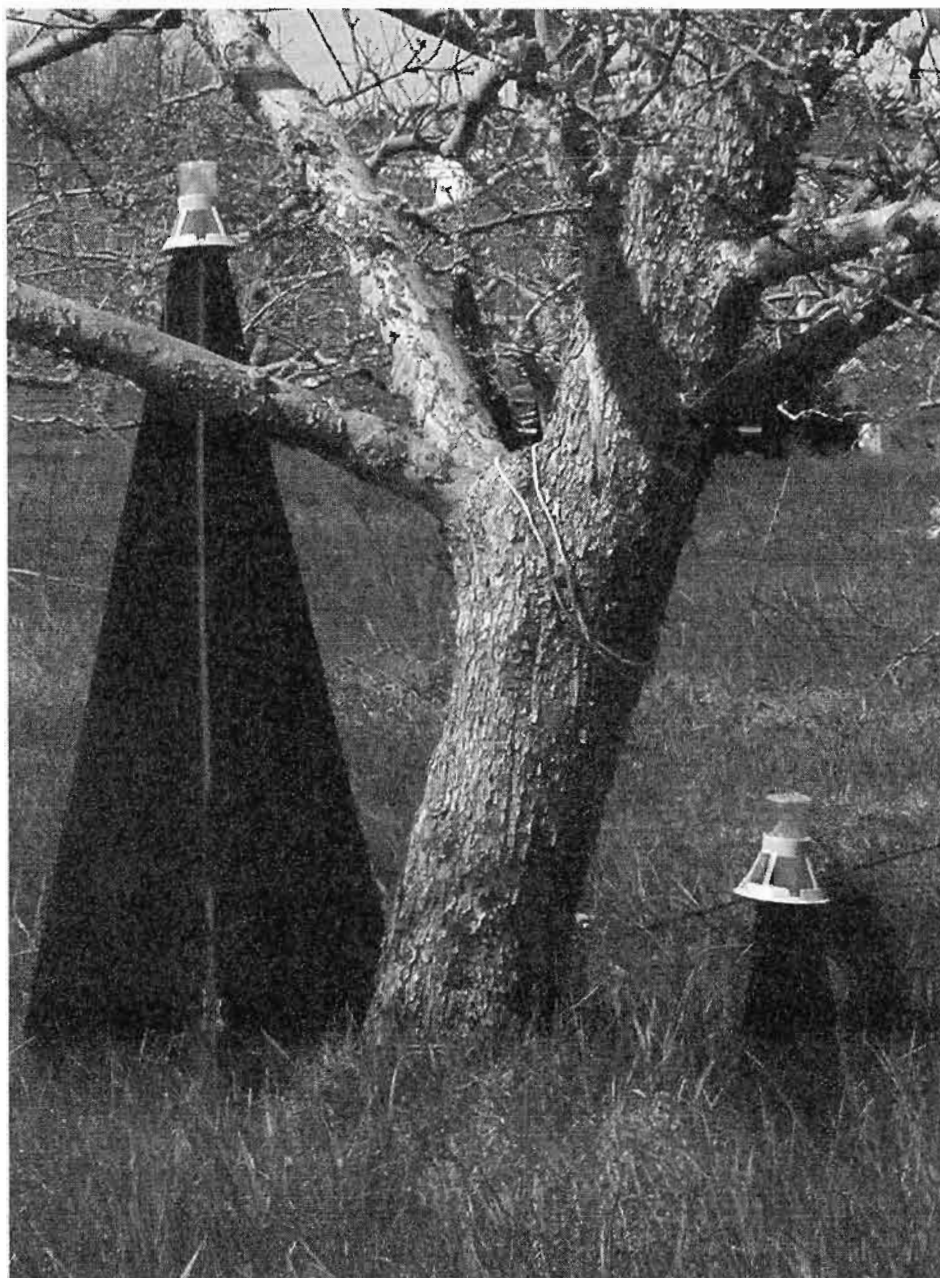


Figure 11. Dispositif pairé utilisé en vergers comprenant un piège pyramidal en bois de taille standard (hauteur : 122 cm) et un de taille miniature (hauteur : 45 cm)(Franz Vanoosthuyse).

Le relevé des pièges a été effectué deux fois par semaine du 10 mai au 5 juillet 2005 et du 2 mai au 10 juillet 2006, soit du stade débourrement au stade nouaison. Le nombre d'individus vivants et morts retrouvés dans la pièce collectrice de chacun des pièges pyramidaux a été noté à chaque journée de dépistage. Lors de chaque relevé, les pièces collectrices ont été nettoyées pour en retirer les arthropodes, les toiles d'araignées et les débris. Afin de maximiser la visibilité des pièges, le couvert végétal était maintenu à une hauteur maximale de 12 cm dans un rayon de 1 m autour de chaque piège. Une évaluation des dégâts d'oviposition de charançons de la prune (40 fruits au hasard / arbre) a été effectuée sur les 15 arbres expérimentaux le 5 juillet 2005 et 2006.

2.2.3 Traitement des données

Les données ont été séparées en trois périodes distinctes, avant (10 au 20 mai 2005; 2 au 8 mai 2006), pendant (21 mai au 2 juin 2005; 11 au 15 mai 2006) et après (3 juin au 5 juillet 2005; 18 mai au 10 juillet 2006) la floraison. Pour chacune de ces années et ces périodes, le nombre total d'individus capturés par les pièges de tailles différentes ont été analysés à l'aide d'un test de Wilcoxon apparié (Daniel, 1990). Ce test non-paramétrique a été utilisé en raison de l'absence de distributions normales des résidus pour chacune de ces périodes. Des analyses de régression linéaire ont également été faites afin de démontrer l'existence de relations entre le nombre de dommages d'oviposition observés (40 fruits au hasard / arbre) et le nombre d'individus capturés par les pièges pour chacune des années d'expérimentation et déterminer les équations décrivant chacune des relations.

2.3 RÉSULTATS

En 2005, les captures des pièges pyramidaux en bois de taille standard se sont distribuées en deux pics (Fig. 12). Lors du premier pic (13 mai), 43 individus ont été capturés et durant le second pic (27 et 30 mai), 187 individus ont été capturés. Les captures totales relevées au cours des autres jours de dépistage ont été de moins de 21 individus. Un total de 346 individus a été capturé durant la saison. Les pièges pyramidaux miniatures ont également connu deux pics de captures (Fig. 12). Le premier pic (27 et 30 mai) correspond à la capture de 108 charançons alors que pour le second pic (7 et 10 juin), 51 individus ont été capturés. La période du 13 au 24 mai est caractérisée par des captures variant entre 23 et 32 individus. Au cours de toutes les autres journées de dépistage, les pièges miniatures ont capturé moins de 13 individus. Un total de 314 individus a été capturé durant la saison.

Le piège de taille standard a capturé en moyenne significativement plus de charançons de la prune que la version miniature ($T_{13} = 16,5$, $P = 0,0199$) durant la floraison (période II) alors qu'après la floraison (période III), le piège pyramidal miniature a capturé en moyenne significativement plus de charançons que le piège de taille standard ($T_{11} = 10$, $P = 0,021$) (Fig. 13).

Les meilleures relations avec les dégâts d'oviposition (5 juillet) ont été obtenues en englobant les données de captures obtenues en 2005 durant (période II) et après (période III) la floraison. La relation obtenue par le piège de taille standard ($r^2 = 0,46$, $P = 0,0053$) est décrite par l'équation : $y = 1,4x + 22,2$ (y = nombre de dégâts observés dans un pommier sur 40 fruits, x = nombres de captures). La relation obtenue par le piège miniature ($r^2 = 0,47$, $P = 0,0051$) est décrite par l'équation : $y = 1,1x + 29,0$ (y = nombre de dégâts observés dans un pommier sur 40 fruits, x = nombre de captures).

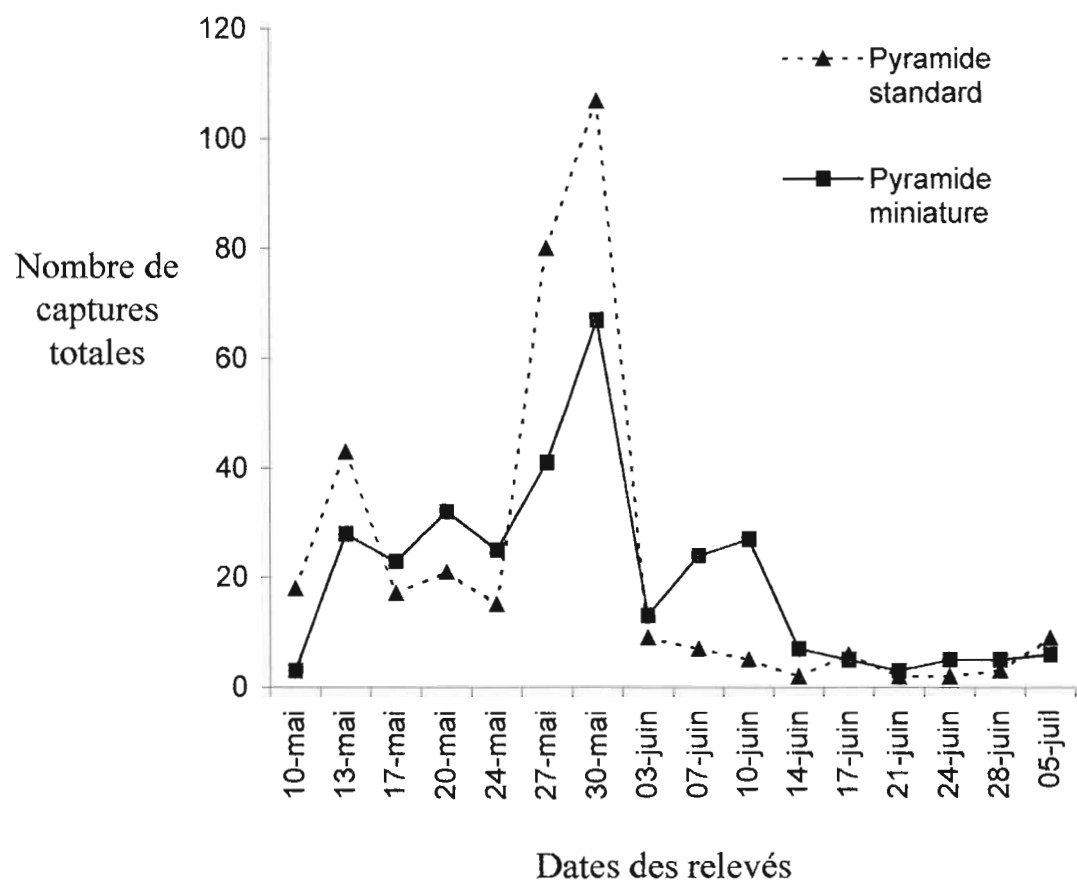


Figure 12. Captures bi-hebdomadaires du charançon de la prune (nombre d'individus) pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature du 10 mai au 5 juillet 2005.

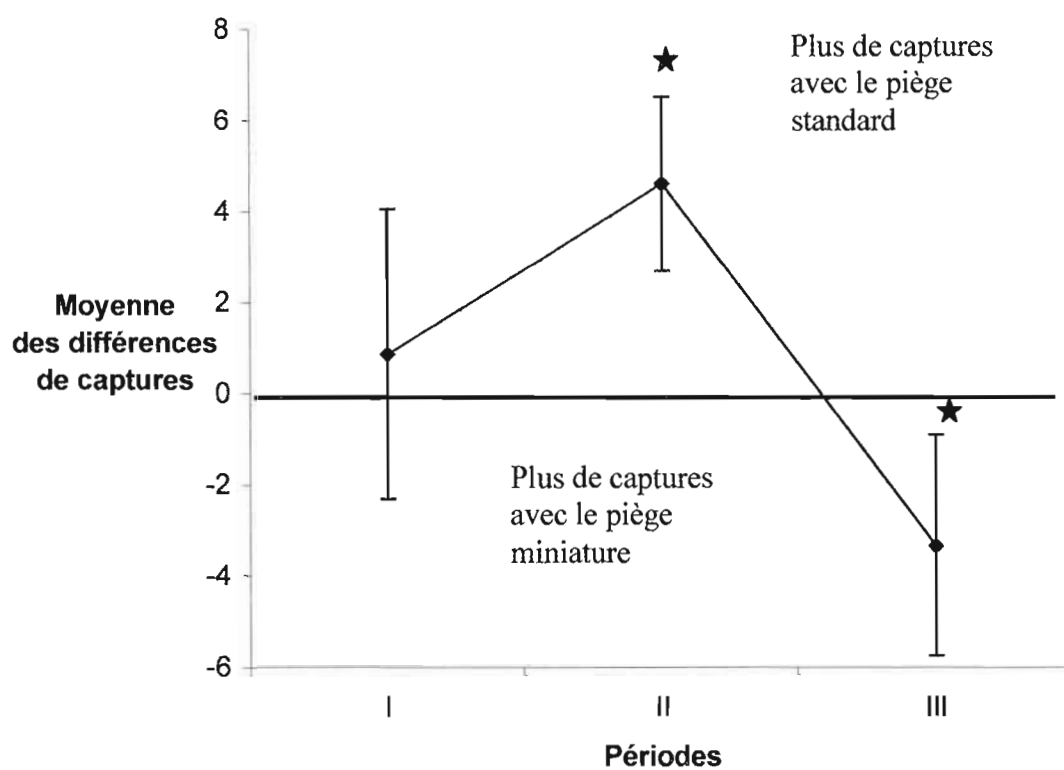


Figure 13. Différence entre les captures totales obtenues en 2005 avant (du 10 au 20 mai 20), pendant (du 21 mai au 2 juin) et après (du 3 juin au 5 juillet) la floraison pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature. Les étoiles indiquent des différences significatives entre les pièges (test de Wilcoxon apparié, $\alpha = 0,05$).

En 2006, les captures obtenues par le piège pyramidal de taille standard ont connu un seul pic de captures (5 mai), soit 50 adultes (Fig. 14). Les captures totales relevées au cours des autres jours de dépistage ont été de moins de 20 individus. Au total, 149 individus ont été capturés durant la saison. Le piège pyramidal de taille réduite a également connu un seul pic de captures (5 mai) se chiffrant à 23 individus (Fig. 14). Pour toutes les autres journées de dépistage, le piège miniature a capturé un maximum de 10 individus par jour. Au total, 118 individus ont été capturés durant la saison.

Durant la période précédant la floraison (2 au 8 mai), le piège pyramidal de taille standard a capturé en moyenne significativement ($T_{12} = 13$; $P = 0,0212$) plus d'individus que sa version miniature (Fig. 15).

Aucune relation significative entre les captures de charançons et le nombre de dégâts observés n'a pu être établie en 2006.

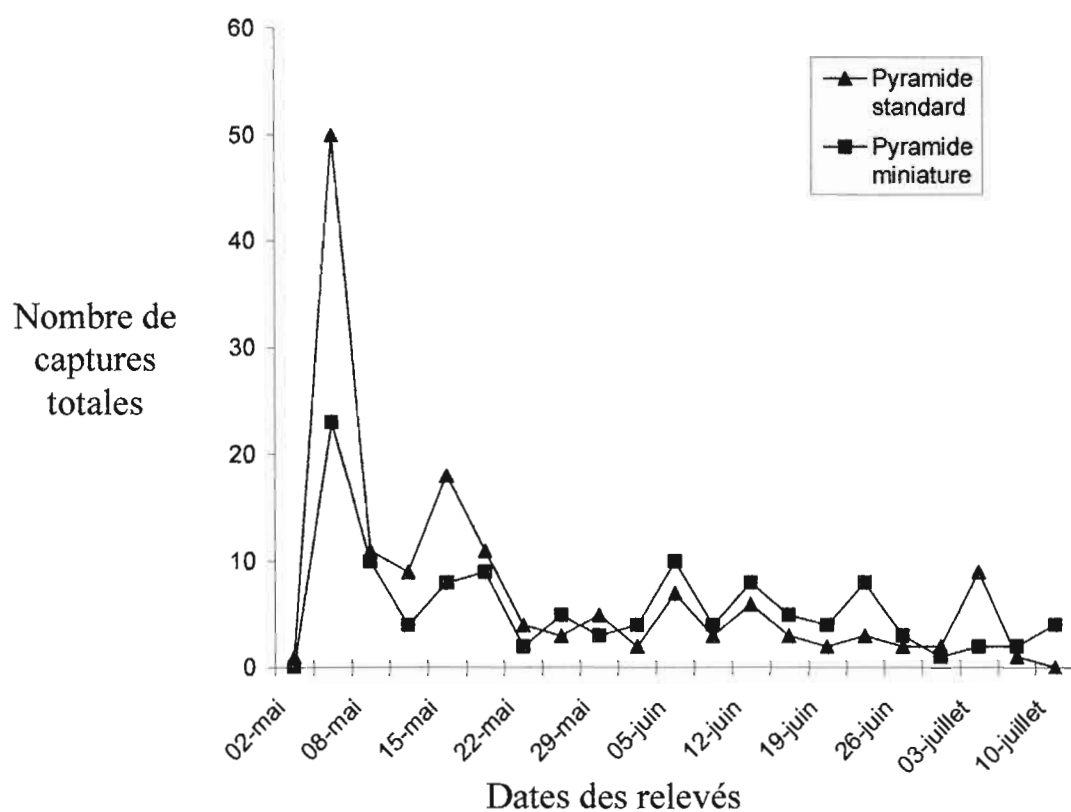


Figure 14. Captures bi-hebdomadaires du charançon de la prune (nombre d'individus) pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature du 2 mai au 10 juillet 2006.

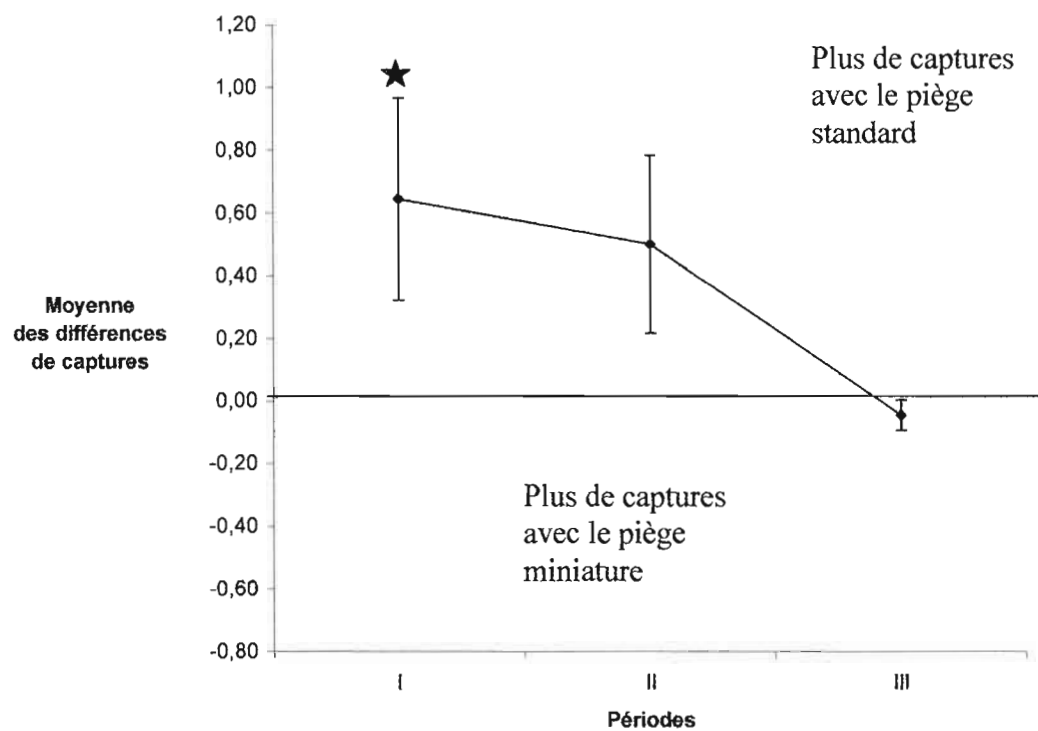


Figure 15. Différence entre les captures totales obtenues en 2006 avant (du 2 au 8 mai), pendant (du 11 au 15 mai) et après (du 18 mai au 10 juillet) la floraison pour le piège pyramidal en bois de taille standard et le piège miniature. Les étoiles indiquent des différences significatives entre les pièges (test de Wilcoxon apparié, $\alpha = 0,05$).

2.4 DISCUSSION

Le plus important pic de captures (27 et 30 mai) obtenu en 2005 pour le piège pyramidal de taille standard (54 % des captures) et la version miniature (34 % des captures) correspond à la période de la floraison. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés dans plusieurs études portant sur des observations visuelles et sur d'autres méthodes de dépistage du charançon de la prune (Chapman, 1938; Cox, 1951; Garman et Zappe, 1929; Quaintance et Jenne, 1912; Smith et Flessel, 1968; Snapp, 1930; Whitcomb, 1929) qui ont démontré que les plus fortes densités de charançons sont observées au début juin. Contrairement aux observations visuelles et à certaines méthodes de dépistage, l'utilisation du piège pyramidal pour dépister le charançon de la prune est moins fastidieux.

Les résultats comparatifs obtenus durant la période couvrant la floraison (période II) en 2005 et avant la floraison (période I) en 2006 sont en concordance avec ceux obtenus par Tedders et Wood (1994) en vergers de pêchers, i.e. le piège de plus grande taille capture plus d'insectes. Avant et pendant la floraison, le charançon de la prune entreprend sa migration saisonnière des sites d'hibernation vers les vergers (Lafleur Hill, 1987). En périphérie du verger, les pièges de grande taille sont plus facilement visibles et ils sont également de taille similaire aux troncs des arbres visés par le charançon de la prune. Les différences de captures observées après la floraison qui favorisent le piège de taille réduite peuvent être reliées au comportement des adultes qui, à ce stade, ont envahi les pommiers et qui se déplacent surtout verticalement, soit du sol aux pommiers et vice-versa (Chouinard *et al.*, 1994). Dans ce contexte, la taille des pièges perd de son avantage attractif. Ceci suggère que plus d'individus seront capturés avec le piège miniature parce que la distance à parcourir sur le piège avant l'interception est plus courte que sur le piège de taille standard, ce

qui minimise les phénomènes comme la diversion, la prédation, et l'aversion, qui peuvent être responsables d'une perte de captures dans le cas de plus grands pièges.

Les résultats obtenus en 2005 ont également démontré l'existence de relations positives significatives entre les captures totales obtenues durant la période II et III et les dégâts d'oviposition observés en juillet, pour le piège pyramidal de taille standard et la version miniature. Les relations établies démontrent que respectivement pour le piège de taille standard et la version miniature, 46 et 47 % de la relation permettant de prédire le nombre de dégâts s'explique par le nombre de captures. Il est donc probable qu'un ou plusieurs autres facteurs, inconnus pour le moment, influencent également cette relation. Nos résultats suggèrent que lorsque la population de charançons est très importante et que peu ou aucun traitement visant cet insecte n'aient été effectués, il est possible d'établir une relation entre le nombre de captures et les dégâts observés. Cette observation est en concordance avec celle de Prokopy *et al.* (2000) qui soulignent l'existence d'une corrélation entre les captures et les dommages dans un verger laissé à l'abandon. L'absence de relation en 2006 est probablement due au faible taux de captures (population plus faible) obtenues, résultant du changement de verger.

Les résultats de captures de notre étude suggèrent à première vue que le piège de taille standard pourrait être utilisé avant et pendant la floraison alors que le piège pyramidal miniature pourrait être utilisé après la floraison, parce qu'ils capturent plus d'individus dans leurs périodes respectives. Par contre, les analyses de régression effectuées avec les données de 2005 suggèrent qu'il ne serait pas nécessaire de faire le dépistage du charançon avant la floraison car les meilleures relations établies pour déterminer les dégâts d'oviposition englobent les données recueillies pendant et après la floraison. Ces analyses démontrent également que la taille des pièges testés ne semble pas avoir d'importance dans l'établissement d'une relation captures-dégâts car

les valeurs de r^2 obtenues sont similaires pour les deux pièges. Cependant, le piège pyramidal miniature pourrait être favorisé car il est plus léger, plus facile à manipuler, plus facile à remiser et moins coûteux à construire que le piège de taille standard. L'établissement de cette méthode de dépistage ne semble être possible que si la taille de population de charançons est élevée et que peu ou pas de traitements visant le charançon ne soient effectués. À cause des valeurs de r^2 modérées (moins de 50 %), il semble y avoir un ou des facteurs inconnus restant à identifier afin d'établir des relations captures-dégâts fiables pouvant être efficacement utilisées en gestion intégrée des vergers de pommiers.

CONCLUSION

Actuellement, la meilleure méthode de contrôle efficace du charançon de la prune envisage le développement d'une méthode de dépistage fiable permettant d'établir un seuil critique d'intervention utile pour cibler les traitements de façon optimale. Une de ces méthodes consiste à utiliser des pièges permettant d'évaluer les populations et les dégâts prévus en absence d'intervention. Le piège pyramidal ayant déjà démontré des performances qui sont généralement meilleures que plusieurs autres modèles de pièges, l'affinement des connaissances sur ce piège se devait d'être fait afin de perfectionner son utilisation.

Le chapitre I avait comme premier objectif d'identifier des matériaux (géotextile, moustiquaire et plastique) pouvant servir à la construction de pièges pyramidaux qui captureraient plus de charançons de la prune que le piège en bois (standard). Le second objectif consistait à déterminer (a priori) l'effet de divers facteurs météorologiques (précipitations, vent, température, périodes de la journée), testés en conditions contrôlées, sur les captures de charançons. L'expérimentation a été effectuée avec des insectes matures et immatures sexuellement dans des salles à conditions contrôlées en utilisant des pièges pyramidaux miniatures. D'un point de vue pratique, le chapitre I a permis d'identifier que le piège pyramidal fait de géotextile performe généralement mieux que les autres matériaux (bois, moustiquaire et plastique). On a également ciblé les conditions pour lesquelles les probabilités de captures de charançons de la prune sont optimales : 1) durant la nuit, 2) lorsque la température est élevée (20 et 25 °C), 3) lorsque le vent est faible ou absent et 4) pendant ou tout juste après une averse.

Suite à l'expérimentation du chapitre I, on a voulu déterminer si le piège pyramidal miniature se comporte comme le piège de taille standard en vergers. Le chapitre II avait pour objectifs de comparer les captures du piège miniature avec celles du piège standard et de démontrer l'existence de relations entre les captures obtenues et les dégâts fruitiers observés (5 juillet). Un dispositif pairé (i.e. un piège de taille standard et un de taille miniature autour de chaque arbre) a été utilisé autour de 15 arbres expérimentaux dans des vergers biologiques. Les captures saisonnières ont été évaluées deux fois par semaine et une évaluation des dégâts fruitiers a été effectuée en fin de saison. Les résultats ont démontré que le piège pyramidal de taille standard capture plus d'individus que la version miniature avant et pendant la floraison. Le piège pyramidal miniature capture quant à lui plus d'individus que le piège de taille standard après la floraison. Les meilleures relations captures-dégâts fruitiers ont été établies en 2005 en considérant l'ensemble des captures obtenues durant et après la floraison pour le piège de taille standard et miniature. Quoique le piège de taille standard capture plus d'individus avant et pendant la floraison et que le piège miniature capture plus d'individus après la floraison, les analyses de régression démontrent que les deux pièges sont aussi efficaces pour prédire les dégâts fruitiers. Par contre, le piège miniature a l'avantage d'être plus léger, plus facile à manipuler, plus facile à entreposer et moins coûteux à construire. Les captures dans les 2 types de pièges expliquant un peu moins de 50% de la relation captures-dégâts, les connaissances sur les vergers laissent supposer que l'établissement de relations nécessite une taille de populations d'insectes importantes, peu ou pas d'épandages visant cet insecte et qu'un ou d'autres paramètres restent encore inconnus.

L'optimisation des captures de charançons de la prune nécessiterait également le développement, le perfectionnement et l'utilisation d'appâts olfactifs en vergers. De tels composés attractifs jumelés aux effets des paramètres étudiés dans ce mémoire

(matériaux de construction, facteurs météorologiques, taille des pièges et période du dépistage) permettront peut-être d'établir de meilleures relations captures-dégâts.

BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong, T. 1958. Life history and ecology of the plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* (Hersbt) (Coleoptera : Curculionidae) in the Niagara Peninsula, Ontario. Can. Entomol. 90: 8-17
- Bobb, M.I. 1949. Hibernation of plum curculio in Virginia J. Econ. Entomol. 4: 19-22.
- Carroll, S. C. et D. R. Rummel. 1985. Relationship between time of boll weevil (Coleoptera : Curculionidae) emergence from winter habitat and response to Grand-lure-baited pheromone traps. Environ. Entomol. 14: 447-451.
- Chagnon, M. et A. Payette. 1990. Modes alternatifs de répression des insectes dans les agroécosystèmes québécois. Ministère de l'environnement et Centre québécois de valorisation de la biomasse, Québec, 447 p.
- Chapman, P.J. 1938. The plum curculio as an apple pest. NY State Agric. Exp. Stn. Bull. 68: 5.
- Chouinard, G., S. B. Hill, C. Vincent et N. N. Barthakur. 1992a. Border-row sprays for control of the plum curculio in apple orchards: behavioural study. J. Econ. Entomol. 85: 1307-1317.
- Chouinard, G., C. Vincent, S. B. Hill et B. Panneton. 1992b. Cyclic behaviour of plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* (Herbst) (Coleoptera : Curculionidae), within caged dwarf apple trees in spring. J. Insect Behav. 5: 385-394.
- Chouinard, G., S. B. Hill et C. Vincent. 1993. Spring behaviour of the plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) within caged dwarf apple trees. Ann. Entomol. Soc. Am. 86: 333-340.
- Chouinard, G., S. B. Hill et C. Vincent. 1994. Spatial distribution and movement of plum curculio adults within caged apple trees. Entomol. Exp. Applic. 70: 129-142.

- Chouinard, G., Y. Morin et R. Charbonneau. 1998. Guide des traitements foliaires du pommier. Conseil des productions végétales du Québec Inc., Québec.
- Chouinard, G., Y. Morin et C. Brodeur. 2001. Lutte contre les insectes et acariens. Pages 101-138 dans Chouinard, G., (coord.) : Guide de gestion intégrée des ennemis du pommier. Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec, Sainte-Foy, Québec.
- Chouinard, G., D. Cormier et G. Bourgeois. 2002. A temperature dependent model describing nocturnal activity of plum curculio in apple trees following bloom. *Acta Horticulturae*. 584: 201-205.
- Cox, J. A. 1951. Plum curculio control on prunes. *J. Econ. Entomol.* 44: 499-504.
- Daniel, W. W. 1990. Applied nonparametric statistics. Second edition. PWS-Kent Publishing Company, Boston. 635p.
- Dixon, S. L. et R. J. Prokopy. 1999. Influence of weather and time of day on plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) tree canopy entry behaviors and evaluation of traps for predicting fruit injury. *J. Entomol. Sci.* 34: 191-202.
- Eller, F. J. et R. J. Bartelt. 1996. Grandiosic acid, a male produced aggregation pheromone from the plum curculio, *Conotrachelus nenuphar*. *J. Nat. Prod.* 59: 451-453.
- Glass, E. H. et S. E. Lienk. 1971. Apple insect and mite populations developing after discontinuance of insecticides: 10-year record. *J. Econ. Entomol.* 64: 23-26.
- Garman, P. et M. P. Zappe. 1929. Control studies on the plum curculio in Connecticut apple orchards. *Conn. Agric. Exp. Stn. Bull* 301: 373-437.
- Guerra, A. A. 1983. Daily attractive response patterns of boll weevils to Grandlure traps in the Lowers Rio Grande Valley of Texas. *Southwest. Entomol.* 22: 466-491.
- Hagley, E. A. C., L. G. Monteith, D. H. C. Herne et R. Trottier. 1977. Pest population buildup in apple orchards following omission of insecticide and acaricide sprays. *Proc. Entomol. Soc. Ont.* 108: 7-11
- Hall, F. R., 1974. Bioeconomics of apple pests: costs appraisal of crop injury data. *J. Econ. Entomol.* 67: 517-521.

- Hallman, G., J. et W. P. Gould, 2004. Evaluation of subtropical and tropical fruits as potential hosts for the southern strain of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae). *Fl. Entomol.* 87: 241-243.
- Hill, S.B., C. Vincent et G. Chouinard. 1999. Evolving ecosystems approach to fruit insect pest management. *Agric. Ecos. Environ.* 73: 107-110.
- Hoyt, S. C., J. A. Leeper, G. C. Brown et B. A. Croft. 1983. Basic biology and management components for insect IPM. IN: Croft, B. A., Hoyt, S. C. (eds.), *Integrated management of insect pests of pome and stone fruits*. Wiley, New-York, pp. 93-151.
- John, R. W., J. R. Cate, E. M. Hernandez et R. T. Navarro. 1992. Host and seasonal activity of the boll weevil (Coleoptera : Curculionidae) in tropical and subtropical habitats of northeastern Mexico. *J. Econ. Entomol.* 85: 74-82.
- Johnson, D. T., P. G. Mulder jr, B. D. McCraw, B. A. Lewis, B. Jervis, B. Carroll et P. J. McLeod. 2002. Trapping plum curculio *Conotrachelus nenuphar* (Herbst) (Coleoptera : Curculionidae) in the Southern United States. *Environ. Entomol.* 31: 1259-1267.
- Lafleur, G., S. B. Hill et N. N. Barthakur. 1985. Observations on mortality, detection, distance and rate of loss label in plum curculio (Coleoptera : Curculionidae), using improved techniques for topical application of radioisotopes on insects. *J. Econ. Entomol.* 78: 1157-1165.
- Lafleur, G., S. B. Hill et C. Vincent. 1987. Fall migration, hibernation site selection, and associated winter mortality of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in a Quebec apple orchard. *J. Econ. Entomol.* 80: 1152-1172.
- Lafleur, G. et S. B. Hill. 1987. Spring migration, within-orchard dispersal, and apple-tree preference of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in Southern Quebec. *J. Econ. Entomol.* 80: 1173-1187.
- Lafleur, G., G. Chouinard, C. Vincent, and D. Cormier 2007. Impact of Trap Architecture, Adjacent Habitats, Abiotic factors and Host Plant Phenology on Captures of Plum Curculio (Coleoptera : Curculionidae) Adults. *J. Econ. Entomol.* 100 : 737-744.
- Lan, Z., H. Scherm et D. L. Horton. 2004. Temperature-dependent development and prediction of emergence of the summer generation of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in the southeastern United States. *Environ. Entomol.* 33: 174-181.

- Landon, F., J. Levieux, D. Rougon et P. Taupin. 1997. Influence of the immediate environment on the dispersal of *Sitona lineatus* L. (Col., Curc.) during crop colonisation. Agric. Ecos. Environ. 64: 261-266.
- Lathrop, F. H. 1949. Biology of plum curculio in Maine. J. Econ. Entomol. 42: 12-18.
- LeBlanc, J.-P. R. 1982. Trapping and monitoring techniques for plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* (Herbst), (Coleoptera : Curculionidae), in a southwestern Québec apple orchard. Ph.D. thesis, McGill University, Montréal, Qc, 170 pp.
- LeBlanc, J.-P. R., S. B. Hill et R. O. Paradis. 1984. Oviposition in scout green apples by plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* (Herbst) (Coleoptera : Curculionidae) and relationship to subsequent damage. Environ. Entomol. 13: 286-291.
- Leskey, T. C. et R. J. Prokopy. 2002. Developing a branch-mimicking trap for adult plum curculios. Entomol. Exp. Applic. 102: 253-259.
- Leskey, T. C. et S. E. Wright. 2004. Monitoring plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* (Coleoptera : Curculionidae), populations in apple and peach orchards in the Mid-Atlantic. J. Econ. Entomol. 97: 79-88.
- Leskey, T. C., A. Zhang et M. Herzog. 2005. Nonfruiting host tree volatile blends: novel attractants for the plum curculio (Coleoptera : Curculionidae). Environ. Entomol. 34: 785-793.
- Leskey, T. C., 2006. Visual cues and capture mechanisms associated with traps for plum curculio (Coleoptera : Curculionidae). J. Econ. Entomol. 41: 97-106
- Levine, E. et F. R. Hall. 1978. Pectinases and cellulases from plum curculio larvae, possible causes of apple and plum fruit abscission. Entomol. Exp. Applic. 23: 259-268.
- Littell, R. C., G. A. Milliken, W. W. Stroup, et R. D. Wolfinger. 1996. System for mixed models. Cary, NC: SAS Institute Inc., 633 pp.
- McAvoy, T.J., et L. T. Kok. 1999. Effect of temperature on eggs, fecundity and adult longevity of *Hylobius transversovittatus* goeze (Coleoptera : Curculionidae), a biological control agent of purple loosestrife. Biological Control 15: 162-167.

- McCullagh, P., et J. A. Ûnelder. 1987. Generalized linear models. Chapman et Hall, London.
- McKibben, G. H., M. J. Grodowitz et E. J. Villavaso. 1988. Comparaison of flight activity of native and two laboratory-reared strains of boll weevils (Coleoptera : Curculionidae) on a flight mill. Environ. Entomol. 17: 852-854.
- McKibben, G. H., J. L. Willers, J. W. Smith et T. L. Wagner. 1991. Stochastic model for studying boll weevil dispersal. Environ. Entomol. 20: 1327-1332.
- Mulder, P. G., B. D. McCraw, W. Reid et R. A. Grantham. 1997. Monitoring adult weevil populations in pecan and fruit trees in Oklahoma. Oklahoma State Univ. Facts F-7190: 1-8.
- Owens, E. D., K. I. Hauschild, G. L. Hubbel et R. J. Prokopy. 1982. Diurnal behavior of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) adults within host trees in nature. Ann. Entomol. Soc. Am. 64: 665-668.
- Padula, A. L., et E. H., Smith. 1971. Reproductive incompatibility between univoltine males and multivoltine females of the plum curculio. Ann. Entomol. Soc. Am. 64: 665-668.
- Paradis, R. O. 1956. Observations sur le cycle évolutif du charançon de la prune, *Conotrachelus nenuphar* (Hbst.), sur la pomme dans le Québec. Ann. Soc. Entomol. Qué. 2: 60-70.
- Piñero, J. C., S. E. Wright et R. J. Prokopy. 2001. Response of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) to odor-baited traps near woods. J. Econ. Entomol. 94: 1386-1397.
- Prokopy, R. J. et C. B. Wirth. 1997a. How do plum curculio approach host trees and pyramid traps? Fruit Notes 62: 5-8.
- Prokopy, R. J. et C. B. Wirth. 1997b. Positioning unbaited pyramid traps to capture plum curculio. Fruit Notes 62: 1-4.
- Prokopy, R. J., S. McIntire, J. Black, M. Prokopy et T. Leskey. 1998a. Comparaison of six different types of unbaited traps for monitoring plum curculios in orchards. Fruit Notes 63: 12-14.
- Prokopy, R. J. et S. E. Wright. 1998b. Plum curculio responses to unbaited pyramid and cone traps. J. Econ. Entomol. 91: 225-234.

- Prokopy, R. J., C. W. Wirth et T. C. Leskey. 1999. Movement of plum curculio toward host trees and traps: flight versus walking. *Entomol. Exp. Applic.* 91: 385-392.
- Prokopy, R. J., B. W. Chandler, T. R. Leskey et S. E. Wright. 2000. Comparison of traps for monitoring plum curculio adults (Coleoptera : Curculionidae) in apple orchards. *J. Entomol. Sci.* 35: 411-420.
- Prokopy, R. J. 2003. Baiting The Trap. *American Fruit Grower* 123, 4, pp. 14.
- Prokopy, R. J., I. Jacome, E. Gray, G. Trujillo, M. Ricci et J. C. Piñero. 2004. Using odor-baiting trap trees as sentinels to monitor plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in apple orchards. *J. Econ. Entomol.* 97: 511-517.
- Quaintance, A. L. et E. L. Jenne. 1912. The plum curculio. *Bull. U.S. Dep. Agric. Bur. Entomol.* 103: 1-250
- Racette, G. 1988. Daily activity of plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* (Herbst) (Coleoptera : Curculionidae), and implications for control. M.Sc. Thesis, Department of Entomology, McGill University, Montreal, Quebec.
- Racette, G., S. B. Hill et C. Vincent. 1990. Actographs for recording daily activity of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae). *J. Econ. Entomol.* 83: 2386-2392.
- Racette, G., G. Chouinard, S. B. Hill et C. Vincent. 1991. Field activity of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in spring. *J. Econ. Entomol.* 84: 1827-1832.
- Racette, G., G. Chouinard, C. Vincent et S. B. Hill. 1992. Ecology and management of plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in apple orchards. *Phytoprotection* 73: 85-100.
- Reissig, W. H., J. P. Nyrop et R. Straub. 1998. Oviposition model for timing insecticide sprays against plum curculio (Coleoptera : Curculionidae) in New York state. *Environ. Entomol.* 27: 1053-1061.
- Rummel, D. R. et D. G. Bottrell. 1976. Seasonally related decline in response of boll weevil to pheromone traps during mid-season. *Environ. Entomol.* 5: 783-787.
- Rummel, D. R. , S. C. Carroll et T. N. Shaver. 1987. Influence of boll weevil trap design on internal trap temperature and Grandlure volatilization. *Southwest. Entomol.* 12: 127-138.

- Sappington, T. W. et D. W. Spurgeon. 2000. Variation in boll weevil (Coleoptera: Curculionidae) captures in pheromone traps arising from wind speed moderation by brush Lines. *Environ. Entomol.* 29: 807-814.
- SAS Institute 2006. The GLIMMIX Procedure, June 2006
<http://support.sas.com/rnd/app/papers/glimmix.pdf> (accessed 17 October 2007).
- Schoene, W. J. 1936. Partial second brood of the plum curculio in Virginia. *J. Econ. Entomol.* 29: 571-573
- Scott, W. M. et A. L. Quaintance. 1911. Spraying peaches for the control of brown rot, scab and plum curculio. U.S. Dep. Agric. Bull. 440.
- Smith, E. H. et J. K. Flessel. 1968. Hibernation of the plum curculio and its spring migration to host trees. *J. Econ. Entomol.* 61: 193-203.
- Snapp, O. I. 1930. Life history and habits of plum curculio in Georgia peach belt. U.S. Dep. Agric. Tech. Bull. 188.
- Tedders, W. L. et B. W. Wood. 1994. A new technique for monitoring pecan weevil emergence (Coleoptera : Curculionidae). *J. Entomol. Sci.* 29: 18-30.
- Tedders, W. L., R. F. Mizell et B. W. Wood. 1996. Influence of trap color on pecan weevil monitoring. *J. Entomol. Sci.* 31: 411-419.
- Thomson, J. R. 1932. Sex differentiation of adults of *Conotrachelus nenuphar*. *J. Econ. Entomol.* 25: 807-810.
- Vincent, C. et N. J. Bostanian. 1988. La protection des vergers de pommiers au Québec : état de la question. *Nat. Can. (Rev. Ecol. Syst.)* 115: 261-276.
- Vincent, C. et M. Roy. 1992. Entomological limits to biological control programs in Quebec apple orchards. *Acta. Phytopathol. Entomol. Hung.* 27: 649-657.
- Vincent, C., G. Chouinard, N. J. Bostanian et Y. Morin. 1997. Peripheral-zone treatment for plum curculio management: validation in commercial apple orchards. *Entomol. Exp. Applic.* 84: 1-8
- Vincent, C., G. Chouinard et S. B. Hill. 1999. Progress in plum curculio management: a review. *Agric. Ecos. Environ.* 73: 167-175.

- Vincent, C., G. Chouinard et T. Leskey. 2004. The Plum curculio, *Conotrachelus nenuphar* Herbst (Coleoptera: Curculionidae), pp. 1769-1774 in J. L. Capinera (ed.) Encyclopedia of Entomology, Vol. 3, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 2580 p.
- Whitcomb, W. D. 1929. The plum curculio in apples in Massachusetts. Mass. Agric. Exp. Stn. Bull. 2489: 26-52.
- Wylie, W. D. 1951. Technique in jarring for plum curculio. J. Econ. Entomol. 44: 818-819.
- Yonce, C. E., D. L. Horton et W. R. Okie. 1995. Spring migration, reproductive behaviour, monitoring procedures and host preference of plum curculio (Coleoptera: Curculionidae) on Prunus species in central Georgia. J. Entomol. Sci. 30: 82-92.